

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **ZAVRŠNI RAD**

**Miroslav Stojanović**

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Miroslav Stojanović

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ja – student Miroslav Stojanović – rođen 05.07.1987. u Zagrebu, JMBG 0507987330039, matični broj 0035164319, upisan u VII. semestar akademske godine 2010./11. radio ovaj rad samostalno sa znanjem stečenim tijekom obrazovanja uz nadzor mentora prof.dr.sc. Zdravka Schauperla.

Zahvaljujem svima koji su mi omogućili proučavanje ovog zanimljivog znanstvenog područja i na pruženim savjetima.

---

Miroslav Stojanović

## Tekst završnog rada



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 04 -07-2011. Prilog
Klasa: 602-04/H-617
Ur.broj: 15-1703-11-208

### ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Miroslav Stojanović** Mat. br.: 0035164319

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje zrakoplovnih sendvič materijala prema ASTM C393-00**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of sandwich cores according to ASTM C 393-00**

Opis zadatka:

Kompoziti predstavljaju vrlo raširen konstrukcijski materijal koji se sve češće koristi u svim područjima tehnike. Za izradu dijelova u zrakoplovstvu se sve češće koriste i tzv. sendvič materijali koji imaju vrlo dobra mehanička svojstva uz malu gustoću. Svojstva tih kompozita ovise o materijalima koji su korišteni u njihovoj izradi, te korištenim parametrima i tehnologiji izrade.

U ovom radu potrebno je izraditi sendvič materijal koristeći ugljična vlakna i aramidnu jezgru (NOMEX). Iz izrađenog materijala potrebno je izraditi epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće opterećenjem u tri odnosno četiri točke. Potrebno je provesti ta ispitivanja u skladu s normom koja ih definira (ASTM C393-00).

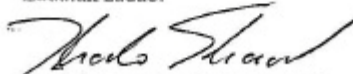
Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke o povezanosti strukture i ispitivanog svojstva izrađenog materijala.

Zadatak zadan:  
18. studenog 2010.

Rok predaje rada:  
1. rok: 04. veljače 2011.  
2. rok: 05. srpnja 2011.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 09. – 11. veljače 2011.  
2. rok: 11. – 13. srpnja 2011.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vedran Žanić

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS – 3A/PDS – 3A

## Sadržaj

Izjava .....	i
Tekst završnog rada .....	ii
Sadržaj .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
Sažetak .....	VIII
1. Uvod .....	1
2. Teorija sendvič kompozita .....	2
2.1. Vlaknima ojačani kompoziti .....	4
2.1.1. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita .....	4
2.1.1.1. Gustoća .....	4
2.1.1.2. Modul elastičnosti .....	5
2.1.1.3. Čvrstoća .....	5
2.1.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita .....	6
2.1.2.1. Svojstva vlakana .....	6
2.1.2.2. Svojstva matrice .....	7
2.2. Materijali komponenata sendvič kompozita .....	8
2.2.1. Materijali kora .....	8
2.2.2. Materijali jezgre .....	11
2.2.2.1. Sačaste jezgre .....	11
2.2.2.2. Korugirane jezgre .....	16
2.2.2.3. Pjenaste jezgre .....	17
2.2.2.5. Rešetkaste jezgre .....	17
2.3. Konstrukcija sendvič kompozita sa sačastom jezgrom .....	19
3. Vrste opterećenja sendvič kompozita .....	21
3.1. Vlačno opterećenje .....	21
3.2. Tlačno opterećenje .....	22
3.2.1. Tlačno opterećenje u smjeru normale .....	22
3.2.2. Tlačno opterećenje u smjeru tangente .....	23
3.3. Savijanje .....	24

4.	Proizvodni postupci za izradu sendvič kompozita .....	27
4.1.	Ručno laminiranje u otvoreni kalup („ <i>wet lay-up/hand lay-up process</i> “) .....	27
4.2.	Vakuumiranje („ <i>Vacuum bagging process</i> “) .....	30
4.3.	Autoklava („ <i>Autoclave process</i> “) .....	32
5.	Izrada ispitnih uzoraka .....	35
6.	Ispitivanje sendvič kompozita prema normi ASTM C393-00 .....	43
6.1.	Izvještaj ispitivanja .....	44
7.	Zaključak .....	57
8.	Literatura .....	58
	PRILOZI .....	60

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjena sendvič kompozita na zrakoplovu Boeing – 787 [1].....	3
Slika 2.	a) Ravni; b) Zakrivljeni sendvič panel [2].....	4
Slika 3.	Orijentacija vlakana u slojevima laminata [5].....	7
Slika 4.	Shema postupka izrade sačaste šesterokutne jezgre prije ekspanzije (HOBE engl. <i>Honeycomb before expansion</i> ) [9].....	12
Slika 5.	Primjena sačastih jezgri kod konstrukcije "leteći rep" zrakoplova F – 14 [8].....	14
Slika 6.	Jezgra od balze : a) Shema [2]; b) Izgled sendvič kompozita [10].....	16
Slika 7.	a) Korugirana jezgra; b) „Dijamantno“ korugirana jezgra c) „Web“ jezgra [9].....	16
Slika 8.	Pjenasta jezgra : a) Shema [2]; b) Izgled sendvič kompozita [11] .....	17
Slika 9.	a) Shema sendvič kompozita od rešetkaste jezgre [12]; b) Izgled izmjenjivača topline od rešetkaste jezgre [9].....	18
Slika 10.	Konstrukcija sendvič kompozita sa sačastom jezgrom [13].....	19
Slika 11.	Vrste ćelija sendvič kompozita : a) Šesterokutne; b) Pravokutne; .....	20
Slika 12.	Shema šesterokutne jezgre [14].....	20
Slika 13.	Vlačno opterećenje sendvič kompozita u smjeru normale n [15].....	21
Slika 14.	Tlačno opterećenje sendviča u smjeru normale [15] .....	22
Slika 15.	Tlačno opterećenje sendviča u smjeru tangente [15].....	23
Slika 16.	Modovi pucanja pri tlačnom opterećenju. 1 – izvijanje, 2 – smicanje jezgre, 3 – lokalno izvijanje kora, 4 – boranje kora : odvajanje od jezgre, 5 – boranje kora : drobljenje jezgre.....	24
Slika 17.	Savijanje sendvič kompozita [15].....	25
Slika 18.	Modovi pucanja sendvič kompozita opterećenog na savijanje : (I) pucanje gornjeg sloja, (II) drobljenje gornjeg sloja, (III) smicanje jezgre, (IV) pucanje donjeg sloja [16].....	26
Slika 19.	Ručno laminiranje u otvoreni kalup .....	27
Slika 20.	Izrada kora sendvič kompozita .....	28
Slika 21.	Vakuumiranje .....	30
Slika 22.	Proces vakuumiranja sendvič kompozita .....	31
Slika 23.	Autoklava .....	32
Slika 24.	Sačasta jezgra od NOMEX – a .....	35
Slika 25.	Plain tkanje korišteno u izradi uzorka .....	36
Slika 26.	Priprema polimerne matrice : a) vaganje komponenata; b) miješanje komponenata .....	38
Slika 27.	Postavljanje "abraž" tkanine.....	39
Slika 28.	Laminiranje kora .....	39
Slika 29.	Rezanje kora .....	41
Slika 30.	Postavljanje kora na jezgru.....	41
Slika 31.	Gotovi uzorci .....	42
Slika 32.	Gotovi uzorci (bočni pogled).....	42
Slika 33.	Skica savojnog opterećenja u tri točke .....	43
Slika 34.	Tijek ispitivanja uzoraka a) - d).....	49
Slika 35.	Karakteristične krivulje opterećenje - progib za P-L uzorke.....	50

Slika 36.	Pucanje gornje kore .....	51
Slika 37.	Drobljenje jezgre .....	51
Slika 38.	Pucanje donje kore .....	52
Slika 39.	Karakteristične krivulje opterećenje - progib za P-W uzorke .....	53
Slika 40.	Karakteristične krivulje opterećenje - progib za V-W uzorke.....	53
Slika 41.	Krivulje opterećenje - progib za V-L uzorke.....	54
Slika 42.	Prikaz srednjih vrijednosti maksimalnih sila F za različite tehnologije izrade uzoraka (1 – tlak i L orijentacija ćelija; 2 – vakuum i L orijentacija ćelija; 3 – tlak i W orijentacija ćelija; 4 – vakuum i W orijentacija ćelija) .....	56



## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Mehanička svojstva materijala kora. $\rho$ = gustoća, $E$ = modul elastičnosti, $G$ = modul smicanja, $\nu$ = Poissonov omjer, $\sigma_V$ = vlačna čvrstoća, $\sigma_T$ = tlačna čvrstoća [2] .....	11
Tablica 2.	Mehanička svojstva saćaste jezgre. $\rho$ = gustoća, $G$ = modul smicanja, $S$ = smična čvrstoća, $W$ - smjer, $L$ – smjer [2].....	19
Tablica 3.	Dimenzije i svojstva jezgre. $\rho$ = gustoća, $s$ = veličina ćelije, $t$ = debljina jezgre, $\sigma_T$ = tlačna čvrstoća, $\tau_C$ = smična čvrstoća, $G_c$ = modul smicanja, $L$ - smjer, $W$ – smjer [17] .....	36
Tablica 4.	Svojstva ugljičnih vlakana.....	37
Tablica 5.	Fizikalna svojstva polimera i otvrdnjivača.....	40
Tablica 6.	Rezultati ispitivanja uzoraka $\tau$ – smično naprezanje u jezgri, $\sigma$ – savojno naprezanje u korama .....	47
Tablica 7.	Odbačeni rezultati ispitivanja .....	48

## POPIS OZNAKA

$c$ , mm .....	Debljina jezgre sendvič kompozita
$d$ , mm .....	Debljina sendvič kompozita
$E_m$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Modul elastičnosti matrice
$E_f$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Modul elastičnosti vlakana
$E_c$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Modul elastičnosti kompozita
$G$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Modul smicanja sačaste jezgre
$l$ , mm .....	Duljina sendvič kompozita
$L$ , mm .....	Raspon oslonaca kidalice
$R_e$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Granica tečenja vlakana
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Vlačna čvrstoća vlakana
$S$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Smična čvrstoća sačaste jezgre
$s$ , mm .....	Veličina ćelije sačaste jezgre
$t$ , mm .....	Debljina jezgre sendvič kompozita
$t_f$ , mm .....	Debljina kora sendvič kompozita
$V_m$ .....	Volumni udio matrice u kompozitu
$V_f$ .....	Volumni udio vlakana u kompozitu
$\rho_f$ , kg/m <sup>3</sup> .....	Gustoća vlakana
$\rho_m$ , kg/m <sup>3</sup> .....	Gustoća matrice
$\rho_c$ , kg/m <sup>3</sup> .....	Gustoća kompozita

---

$\sigma$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Savojno naprezanje u korama sendvič kompozita
$\sigma_V$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Vlačna čvrstoća (kora i jezgre)
$\sigma_T$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Tlačna čvrstoća (kora i jezgre)
$\tau$ , N/mm <sup>2</sup> .....	Smično naprezanje u jezgri sendvič kompozita
$\nu$ .....	Poassonov omjer



## **Sažetak**

Kompozitni materijali nastali kombinacijom materijala različitih svojstava, danas se vrlo često primjenjuju u raznim granama tehnike pa tako i u zrakoplovstvu. Takozvani sendvič kompoziti u zrakoplovstvu se koriste pri izradi vrlo opterećenih dijelova zrakoplova kao što su trup i noseće površine zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava kao što su krutost, elastična stabilnost i specifična čvrstoća. Svojstva ovih kompozitnih materijala ovise o vrsti materijala koji su korišteni u izradi, parametrima i tehnologiji izrade. Ovaj rad prikazuje postupke izrade, materijale i ispitivanje savojne čvrstoće sendvič kompozita od ugljičnih vlakana i aramidne jezgre (NOMEX). Ispitivanje je provedeno savojnim opterećenjem u tri točke prema normi ASTM C393-00 na prethodno izrađenim uzorcima. Prikazana je usporedba rezultata ispitivanja u ovisnosti o tehnologiji izrade. Obradena je i teorija sendvič kompozita sa prikazanim materijalima, tehnologijama izrade i vrstama opterećenja koja se javljaju.

## 1. Uvod

Sve veći zahtjevi zrakoplovne industrije i povećanje sigurnosnih standarda doveli su do povećane upotrebe sendvič kompozita u velikom broju zrakoplovnih konstrukcija. Njihova upotreba na mjestima najvećih dinamičkih opterećenja i velikih temperaturnih oscilacija posljedica je boljih svojstava u odnosu na konvencionalne metalne konstrukcije. Također su otporniji na agresivne medije i koroziju koja predstavlja velik problem jer se pojavljuje na skrivenim i teško dostupnim mjestima. Prednost sendvič kompozita je i mogućnost brzog popravka oštećenih konstrukcija, bez potrebe većih rastavljanja konstrukcije i izuzimanja zrakoplova iz funkcije. Unatoč mnogim prednostima nad klasičnim konstrukcijama, kompozitne konstrukcije su vrlo složene i zahtijevaju posebne tehnološke procese izrade i pažljivu montažu.

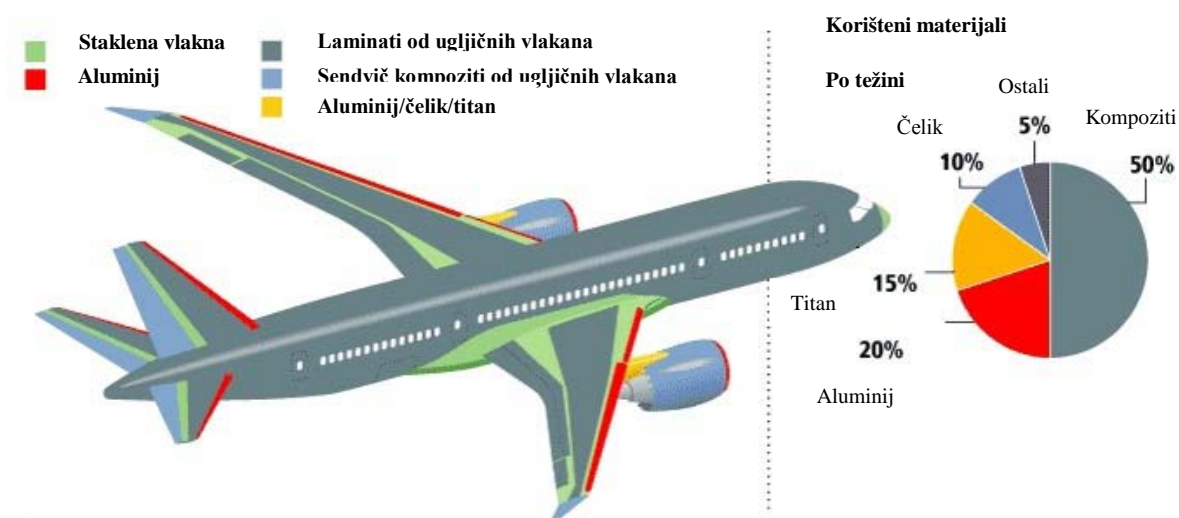
Ovaj rad prikazuje osnove teorije sendvič kompozita, karakteriske, konstrukciju i svojstva materijala od kojih su izrađeni te tehnologije izrade. Obradena su vlačna i tlačna opterećenja te pripadajuća mehanička svojstva i elementi strukture sendvič kompozita koji utječu na čvrstoću pri takvim opterećenjima. Posebno je obrađeno ispitivanje opterećenja na savijanje sendvič kompozita koje može poslužiti za određivanje savojnog naprezanja u korama i smičnog naprezanja u jezgri. Uzorci za ispitivanje su samostalno izrađeni različitim tehnologijama i zatim ispitani u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Detaljno su opisane korištene tehnologije izrade ispitnih uzoraka i uvjeti polimerizacije. Prikazana je usporedba mehaničkih svojstava sendvič kompozita u ovisnosti o tehnologiji izrade i strukturi.

## 2. Teorija sendvič kompozita

Kompozitni materijali ili kompoziti su dobiveni spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem da se dobije materijal takvih svojstava koja ne posjeduje niti jedan materijal zasebno. Na taj način moguće je postići kombinaciju svojstava kao što je čvrstoća, krutost, težina, temperaturna i korozijska postojanost, toplinska i električna vodljivost i tvrdoća, koju klasični konstrukcijski materijali ne posjeduju.

Temeljna podjela kompozita je na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Matrici se dodaju vlakna ili čestice s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava. Čvrstoća vlaknima ojačanih kompozita uvelike ovisi o jačini i kvaliteti veze između matrice i vlakana. Također veliku ulogu ima orijentacija vlakana i smjer opterećenja. Prema promjeru vlakana dijelimo ih na viskere, vlakna i žice. Metalni i polimerni kompoziti imaju visoku specifičnu čvrstoću (omjer čvrstoće i gustoće) i specifičnu krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće) što se može postići primjenom matrica male gustoće.

Sendvič kompoziti dobivaju se spajanjem dva tanka vanjska sloja odnosno kora na deblju jezgru. Dijelovi izrađeni od sendvič kompozita u zrakoplovnoj industriji su vrhovi krila, kormila pravca i dubine, podne ploče i dijelovi kućišta motora što se vidi na primjeru Boeinga – 787, slika 1. Također se koriste za izradu trupa a takav tip konstrukcije trupa u zrakoplovstvu se naziva „*stressed-skin construction*“ ili takozvana nosiva oplata, u kojoj vanjski slojevi sendvič kompozita nose gotovo sva narinuta ravninska i poprečna savojna opterećenja. Na slici 1 također se vidi da je udio kompozita među kojima su i sendvič kompoziti, u ukupnoj težini, korištenih pri izradi Boeinga – 787 oko 50 %.



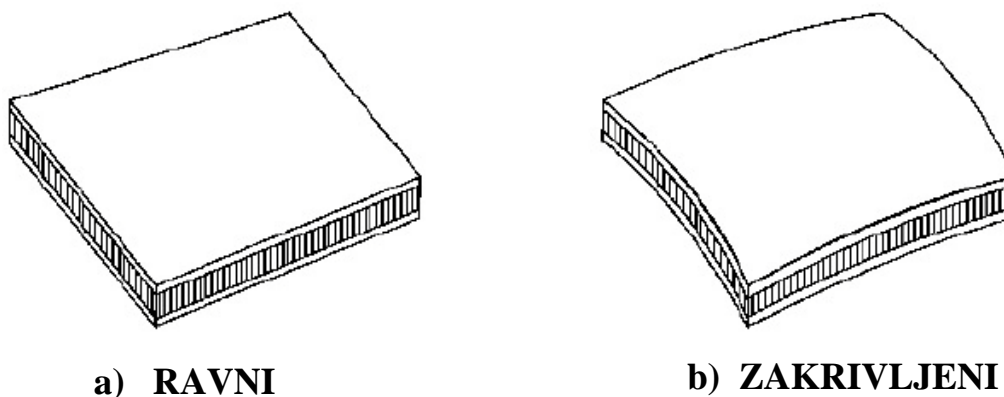
**Slika 1. Primjena sendvič kompozita na zrakoplovu Boeing – 787 [1]**

Tanki razmaknuti vanjski slojevi osiguravaju dovoljnu savojnu krutost sendviča. Jezgra razdvaja vanjske slojeve i prenosi smična naprezanja te osigurava dovoljnu smičnu krutost. Također osigurava dovoljnu krutost u ravninama okomitim na površinske slojeve. Vanjski slojevi obično se rade od materijala veće čvrstoće i krutosti od jezgre kao što su legure aluminija, vlaknima ojačani polimerni materijali, titan, čelik, „ukočeno drvo“ (šperploče). Osnovni princip pri izradi sendvič kompozita je međusobno razmaknuti čvrste i tanke slojeve dovoljno daleko, kako bi se dobio visoki omjer krutosti i težine tj. specifična krutost. Ovo se postiže primjenom lagane jezgre koja osigurava dovoljnu smičnu čvrstoću i željenog oblika vanjskih slojeva upotrebom raznih medija za spajanje kao što su adhezivi, polimeri, lemovi i zavari. Kako bi jezgre bile što laganije obično se prave od materijala male gustoće, ćelijastih konstrukcija (saćastih jezgri od tankih listova raznih materijala), korugiranih (valovitih) tankih listova i takozvanih „textile/truss“ (rešetkaste) jezgri. Materijale jezgre općenito dijelimo na ćelijaste i strukturalne. Neke od ćelijastih jezgri su ćelijaste pjene, polimerne ili metalne pjene, saćaste i balza jezgre. Strukturalne jezgre su mrežaste jezgre i sastoje se od kontinuirane mreže napravljene od krutog materijala, oblikovanog na takav način da razdvaja kore i učinkovito prenosi smična naprezanja.

Jezgre imaju vrlo malo gustoću i one su najčešće najslabija točka sendvič kompozita. Veza između jezgre i kora u nekim slučajevima može biti presudna za čvrstoću sendviča.



Glavna razlika u konstrukcijskim procedurama za strukturne elemente od sendvič kompozita u odnosu na homogene materijale je uzimanje u obzir smičnih svojstava jezgre na izvijanje, progib i naprezanje u sendvič konstrukciji [2]. Sendvič strukture mogu biti napravljene od ravnih ili zakrivljenih panela, slika 2.



Slika 2. a) Ravni; b) Zakrivljeni sendvič panel [2]

## 2.1. Vlaknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita postiže se povećanje čvrstoće, krutosti i žilavosti dodavanjem vlakana koja su čvrsta, kruta i krhka u mekaniju i duktilniju matricu [3]. Opterećenja se prenose sa matrice na vlakna koja nose veći dio naprezanja te se osigurava čvrstoća i duktilnost kompozita. Vlakna mogu biti od ugljika, polimera, stakla, bora, aramida itd. a mogu se izrađivati od raznih vrsta tkanine koja može biti različito usmjerena.

### 2.1.1. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita

#### 2.1.1.1. Gustoća

Gustoću vlaknima ojačanih kompozita možemo odrediti iz zakona miješanja [3] :

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (1)$$

Indeks „m“ odnosi se na matricu a „f“ na vlakno.  $\rho_c$ ,  $\rho_m$  i  $\rho_f$  su gustoće kompozita, matrice odnosno vlakana a  $V_m$  i  $V_f$  su volumni udjeli matrice odnosno vlakana. Također zakonom miješanja možemo predvidjeti električnu i toplinsku vodljivost u smjeru vlakana, ali vlakna moraju biti kontinuirana i jednosmjerna.

#### 2.1.1.2. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti se određuje u ovisnosti o smjeru djelovanja opterećenja u odnosu na vlakna. Ako opterećenje djeluje paralelno sa kontinuiranim jednosmjernim vlaknima iz zakona miješanja određujemo modul elastičnosti [3]:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f \quad (2)$$

Gdje su :

- $E_c$  modul elastičnosti kompozita
- $E_m$  modul elastičnosti matrice
- $E_f$  modul elastičnosti vlakana

Ako opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, modul elastičnosti možemo odrediti iz izraza [3] :

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (3)$$

#### 2.1.1.3. Čvrstoća

Čvrstoća vlaknima ojačanih kompozita ovisi o kvaliteti i jačini veze između vlakana i matrice, temperaturi primjene i uključcima zraka a ograničena je deformiranjem matrice. Rezultati koje dobijemo eksperimentalnom analizom gotovo se uvijek razlikuju od onih dobivenih proračunom što je posljedica kvalitete veze i tehnologije izrade. Svojstva je teže predvidjeti ako su vlakna diskontinuirana. Duljina vlakana također utječe na svojstva. Rezultati proračuna i ispitivanja manje će odstupati ako su vlakna dulja od kritične duljine.

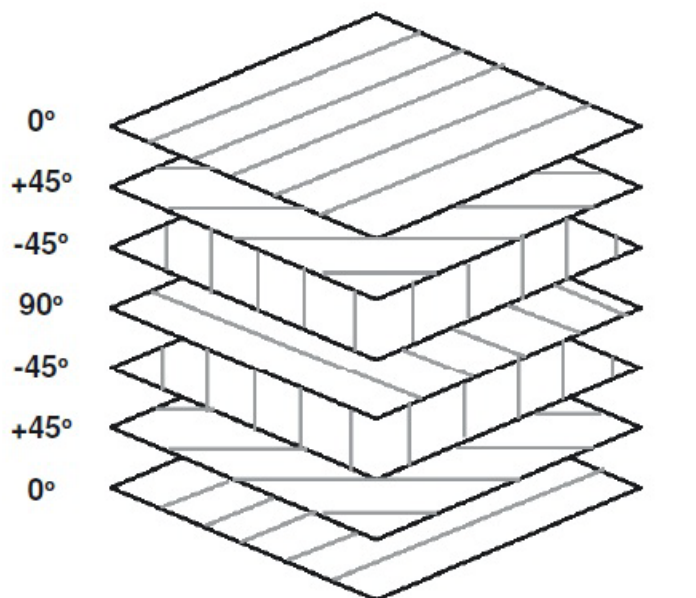
### 2.1.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

#### 2.1.2.1. Svojstva vlakana

Vlakna trebaju imati visoku čvrstoću, krutost, malu masu i visoko talište. Također trebaju imati visoku specifičnu čvrstoću i specifični modul elastičnosti. Specifična čvrstoća definirana je kao omjer granice tečenja  $R_e$  ili vlačne čvrstoće  $R_m$  i gustoće  $\rho$  a specifični modul elastičnosti kao omjer modula elastičnosti  $E$  i gustoće  $\rho$  [3].

Najviši specifični modul elastičnosti imaju materijali sa kovalentnim vezama i niskim atomskim brojem zbog jakih međuatomskih sila, kao grafit (ugljik) i bor te bi se oni trebali primjenjivati u kompozitima [3]. Također „*kevlar*“, što je komercijalni naziv za aromatski poliamidni polimer ima odlična mehanička svojstva ali mu je nedostatak nisko talište. Staklo i  $Al_2O_3$  imaju malu gustoću te stoga visoku specifičnu čvrstoću i specifični modul elastičnosti. Metali kao što su berilij i volfram imaju visok modul elastičnosti te su pogodni za primjenu u kompozitima. Najskuplja i najkompliciranija je proizvodnja viskera koji imaju najvišu čvrstoću i krutost.

Dobra mehanička svojstva postižu se slaganjem vlakana pod kutem od  $0^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na smjer glavnog opterećenja. Zbog jednostavnosti vlakna slažemo pod kutevima od  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  i  $90^\circ$ . Laminatne strukture, slika 3, koje se sastoje od više slojeva jednosmjernih ili dvosmjernih vlakana povezanih polimernom matricom, posjeduju izrazito ortotropna svojstva tj. imaju najveću čvrstoću i krutost u smjeru opterećenja ( $0^\circ$ ) dok su u ostalim smjerovima svojstva nepovoljnija. Kada laminat ima  $n$  slojeva vlakana pod međusobnim kutem od  $\pi/n$  (npr.  $0^\circ$  i  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$  ili  $0^\circ$  i  $\pm 60^\circ$ ) mehanička svojstva se ne mijenjaju s promjenom smjera opterećenja pa kažemo da su takvi kompoziti kvaziizotropni [4]. Ovakve kompozite primjenjujemo kod dvoosnog opterećenja ili visokog lokalnog naprezanja. Slaganje vlakana na ovakav način smatra se neefikasno jer se najčešće treba iskoristiti upravo izotropnost kompozita.



Orijentacija vlakana počevši od  
gornje površine (0/+45/-45/90/-45/+45/0)

**Slika 3. Orijentacija vlakana u slojevima laminata [5]**

Kao što je spomenuto ojačala ne moraju biti samo u obliku vlakana. To mogu biti čestice, viskeri (fini monokristali izrazito velike čvrstoće) i kratka vlakna. Ipak, najveća je čvrstoća kod ojačala u obliku vlakana, što je posljedica činjenice da kod ovih materijala ne dolazi do plastičnog tečenja pa do oslabljenja dolazi usljed mikroskopskih grešaka (pukotina), naročito površinskih. Vjerojatnost pojave grešaka je obrnuto proporcionalna volumenu materijala, tako da se smanjenjem promjera vlakana, odnosno smanjenjem promjera po metru duljine povećava čvrstoća [6]. Pojava grešaka smanjuje se i sa smanjenjem duljine vlakana. Nedostatak je što svojstva vlakana mogu uvelike odstupati od referentnih vrijednosti. Na broj mikropukotina također utječe tehnologija izrade, vrsta i zaštitne prevlake vlakana.

#### 2.1.2.2. Svojstva matrice

Materijali matrice moraju biti žilavi i duktilni kako bi prenosili opterećenje na vlakna i onemogućili napredovanje pukotine od prekinutih vlakana kroz kompozit. Matrica mora biti čvrsta kako bi doprinijela ukupnoj čvrstoći kompozita. Razlikujemo kompozite sa polimernom matricom (takvi se kompoziti nazivaju PMC engl. *Polymer Matrix Composites*), metalnom

matricom (MMC engl. *Metal Matrix Composites*) i keramičkom matricom (CMC engl. *Ceramic Matrix Composites*). Primjenu određene matrice uvjetovat će njeno talište, mehanička svojstva kao i gustoća odnosno masa. Polimerne matrice mogu se upotrebljavati do  $80^{\circ}\text{C}$  (nezasićene poliesterske smole) i  $315^{\circ}\text{C}$  za poliamide. Metalne matrice mogu se upotrebljavati i pri višim temperaturama. U zrakoplovstvu matrice moraju biti otporne i na različite agresivne medije kao što su goriva i hidraulički fluidi te razne kemikalije koje se koriste u održavanju te moraju imati što manju masu.

## **2.2. Materijali komponenata sendvič kompozita**

### **2.2.1. Materijali kora**

Za izradu vanjskih slojeva koriste se vlaknima ojačani polimerni materijali, laminati, drvo te plastomeri. Također se koriste i tanki slojevi metala kod metalnih sendviča kao što je aluminij i čelik, te slojevi papira. Mehanička svojstva nekih materijala koji se koriste za izradu kora navedena su u tablici 1. Neki od najčešće korištenih materijala vlakana za izradu kora kod PMC – a su :

- **Ugljična (karbonska) vlakna**

Danas vrlo rasprostranjena i najčešće korištena u zrakoplovstvu za izradu zmaja zrakoplova i kućišta motora su ugljična vlakna. Pogodnost za korištenje u zrakoplovnoj industriji daju im visoka specifična čvrstoća i krutost te manja gustoća (oko  $1700 \text{ kg/m}^3$ ) u odnosu na staklena vlakna (oko  $2500 \text{ kg/m}^3$ ).

Moguće ih je kvalificirati prema modulu elastičnosti, sirovini iz koje su dobivena te završnoj toplinskoj obradi. Prema modulu elastičnosti ugljična vlakna možemo klasificirati kao UHM (vrlo visoki modul elastičnosti), HM (visoki modul elastičnosti), IM (umjereni modul elastičnosti) i HS (visoka vlačna čvrstoća). Prema završnoj toplinskoj obradi ugljična vlakna dijele se na : TIP 1 (visoko temperaturna toplinska obrada - HHT) gdje su temperature iznad

2000<sup>0</sup>C za dobivanje vlakana visokog modula elastičnosti, TIP 2 (umjereno temperaturna toplinska obrada - IHT) temperature oko i iznad 1500<sup>0</sup>C i TIP 3 (niskotemperaturna toplinska obrada - LHT) s temperaturama ne većim od 1000<sup>0</sup>C niskog modula elastičnosti i niske čvrstoće. Ugljična vlakna dobivaju se različitim postupcima karbonizacije iz umjetne svile „rayon-a“, poliakrilonitrila (PAN) i na bazi polimera (*pitch based*). Vlakna dobivena iz polimera imaju veći vlačni modul od PAN vlakana zbog visokogرافitizirajućeg karaktera sirovine iz koje su napravljena. Međutim, imaju manju tlačnu i smičnu čvrstoću i poroznija su. Također se razlikuju po sadržaju ugljika koji iznosi 80 % kod vlakana dobivenih iz smole i 50% kod PAN vlakana [4].

- **Borova vlakna**

Borova vlakna dobivaju se takozvanim kemijskim napanjanjem (CVD – Chemical vapour deposition) bora na užareni volfram ili na ugljična vlakna na bazi polimera. Različitost u koeficijentima toplinskog širenja jezgre od volframa i naparenog bora rezultira u zaostalim naprezanjima koja se pojavljuju tijekom hlađenja na sobnu temperaturu. Borova vlakna imaju znatno veći promjer (125 – 140 μm) u odnosu na druga vlakna (ugljična imaju promjer oko 10 μm). Ovaj relativno velik promjer vlakana ima za posljedicu smanjenu elastičnost, zbog toga što je bor vrlo krhak materijal [7]. Osim toga vlakna su skupa i vrlo tvrda tako da je PMC – e na bazi borovih vlakana vrlo teško strojno obrađivati (bušiti i rezati). Zbog tih nedostataka i niže cijene, ugljična su vlakna uvelike zamijenila borova pri izradi PMC – a u zrakoplovstvu.

- **Staklena vlakna**

Staklena vlakna proizvode se od silicijevog oksida (SiO<sub>2</sub>) i najčešći su sastav PMC-a zbog svoje visoke čvrstoće i niske cijene. Visoko čvrsta staklena vlakna primjenjuju se kod zahtjevnijih struktura kao što su tlačne posude i kućišta raketa. Njihova primjena u zrakoplovnim strukturama ograničena je zbog niske specifične krutosti. Međutim uvelike se koriste kod jedrilica i ostalih zrakoplova gdje niska specifična krutost nije konstrukcijsko ograničenje i kod sekundarnih dijelova konstrukcije kao što su razni dijelovi oplata. Zbog

svojih dielektričnih svojstava koriste se kod konstrukcija gdje je potrebna propusnost elektromagnetskog zračenja kao što su zaštitne kupole radara.

Postoje dvije vrste stakla koje se primjenjuju kod zrakoplovnih struktura. E - staklo (kalcij alumino - borosilikatno staklo ) i S - staklo (magnezij alumino - silikatno staklo). E - staklo se najčešće upotrebljava zbog niže cijene i svoje čvrstoće te električnog otpora. S - staklo se koristi kada je potrebna visoka čvrstoća, modul elastičnosti, stabilnost na ekstremnim temperaturama i otpornost u korozivnoj okolini. Postoji i modificirana verzija E - stakla ECR (engl. „*E glass chemically resistant*“) staklo koje ima povećanu otpornost na kemikalije.

- **Aramidna vlakna**

Aramidna vlakna trgovačkog naziva „*kevlar*“ (tvrtka Du Pont) i „*Nomex*“ prva su organska vlakna dovoljne čvrstoće i krutosti za primjenu u zrakoplovstvu. Postoje različiti tipovi (Kevlar 29, 49, 149) koje se razlikuju po mehaničkim svojstvima. Ova vlakna imaju značajno veću specifičnu čvrstoću i krutost od staklenih vlakana. Vlačna čvrstoća je visoka i pri temperaturama koje prelaze  $400^{\circ}\text{C}$ . Međutim tlačna čvrstoća aramidnih vlakana vrlo je niska što predstavlja ograničenje u upotrebi ovih vlakana kod tlačnih opterećenja.

Glavna prednost aramidnih vlakana je njihova sposobnost absorpcije velike količine energije tijekom loma i mogućnost plastičnog deformiranja pri tlačnom opterećenju. PMC - i na bazi aramida koriste se za balističku zaštitu te kod kućišta motora i dijelova oplata zrakoplova te slojeva na saćastim panelima. Također se koriste za zaštitne kupole radara i ostale konstrukcije gdje su potrebna dielektrična svojstva. Imaju visoku tendenciju upijanja vlage. Na  $180^{\circ}\text{C}$  čvrstoća ima opada na 80% čvrstoće pri sobnoj temperaturi, a porastom temperature čvrstoća još više opada [4]. Otporna su na puzanje i na pojave pukotina kod dugotrajnog opterećenja. Nedostatak im je smanjenje čvrstoće pri dužem izlaganju ultraljubičastom zračenju što može biti problem kod kablova sa otvorenim vlaknima ali kod PMC - a matrica od polimera štiti vlakna od zračenja.

- **Vlakna od silicijevog karbida (SiC)**

Silicijev karbid je keramičko vlakno koje se može dobiti na dva načina. Prvi, CVD postupak, je sličan kao kod borovih vlakana. Tu se silicij i ugljik kemijski naparuju na jezgru od ugljika (tzv. SCS - 6 vlakna razvijena u AVCO - u u SAD - u). Ova vlakna su relativno kruta i fleksibilna sa promjerom oko 140  $\mu\text{m}$ . Drugi način je takozvanom kontroliranom pirolizom (kemijskim raspadanjem uzrokovanim toplinom) polimera (metoda razvijena u Japanu pod nazivom Nicalon). Vlakna dobivena na ovaj način su po mikrostrukтури i promjeru slična ugljičnim vlaknima i puno su elastičnija. Iako je CVD postupak znatno skuplji, vlakna dobivena na taj način imaju puno bolja svojstva.

**Tablica 1. Mehanička svojstva materijala kora.  $\rho$  = gustoća, E = modul elastičnosti, G = modul smicanja,  $\nu$  = Poissonov omjer,  $\sigma_V$  = vlačna čvrstoća,  $\sigma_T$  = tlačna čvrstoća [2]**

Materijal	$\rho$ $\text{g/cm}^3$	E $\text{KN/mm}^2$	G $\text{KN/mm}^2$	$\nu$	$\sigma_V$ $\text{N/mm}^2$	$\sigma_T$ $\text{N/mm}^2$
Aluminij (2024-T3)	2.80	73	27.4	0.33	414	414
Čelik (AISI-1025)	7.80	207	80.0	0.30	394	394
Titan	4.40	108	42.4	0.30	550	475
S-staklo/EP <sup>1</sup>	1.73	20.6	3.10	0.12	261	177
E-staklo/EP <sup>1</sup>	2.00	26.6	4.63	0.144	422	410
AS4/Karbon/EP <sup>1</sup>	1.63	59.5	4.96	0.047	584	491

<sup>1</sup>Kompoziti se sastoje od tkanih 0° i 90° vlakana u epoksidnoj matrici (EP)

## 2.2.2 Materijali jezgre

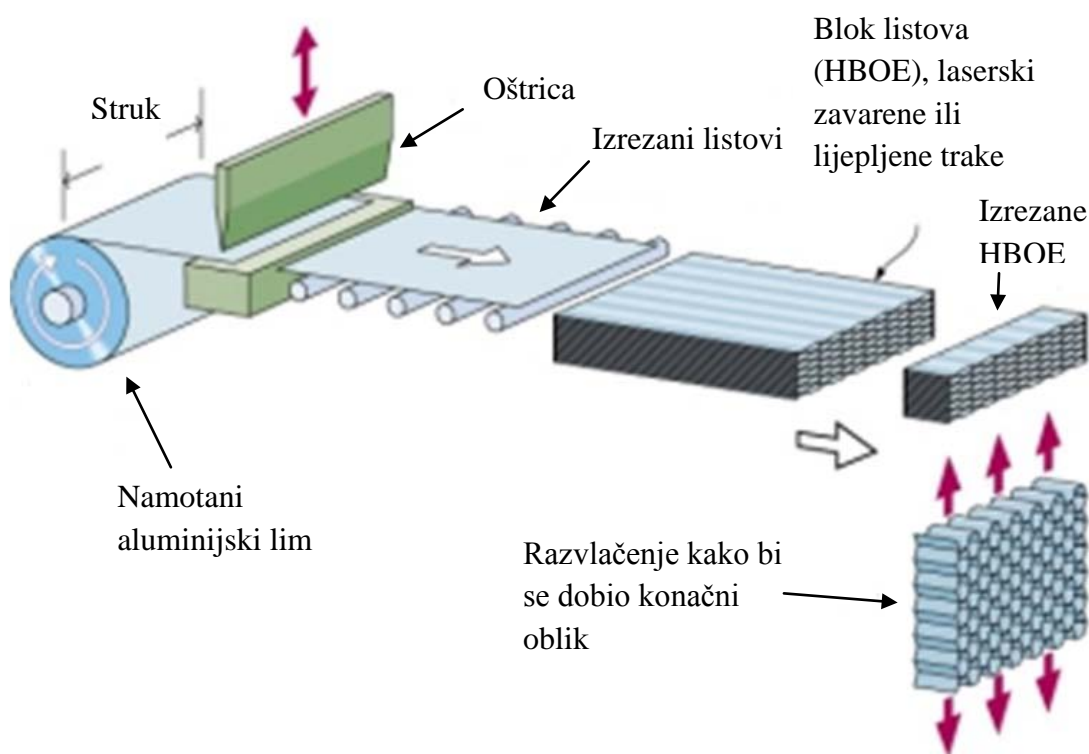
### 2.2.2.1. Saćaste jezgre

Saćaste jezgre izrađuju se od raličitih materijala : od papira i kartona za konstrukcije male čvrstoće i krutosti namijenjene za mala opterećenja, do materijala male gustoće, visoke čvrstoće i krutosti za zrakoplovne konstrukcije. Mehanička svojstva tipičnih materijala za



izradu saća prikazana su u tablici 2. Saće se mogu oblikovati u ravne i zakrivljene geometrije bez dodatnog zagrijavanja ili vanjskog opterećenja.

Saće od plastomera proizvode se ekstruzijom te se zatim režu na željenu debljinu. Aluminijske i papirnate saće proizvode se višestupanjskim procesom kod kojeg se veliki tanki slojevi papira (1,2 – 2,4 m) „*printaju*“ sa naizmjeničnim, tankim trakama adheziva te se zatim stavljaju u zagrijanu prešu dok adheziv ne očvrstne. Kod aluminijskih saća takvi složeni tanki listovi režu se na određenu debljinu te se lijepe ili laserski zavaruju. Takvi slojevi koji se nazivaju blokovi kasnije se pažljivo rastežu i šire da bi se dobili listovi kontinuiranih šesterokutnih ćelija, slika 4.



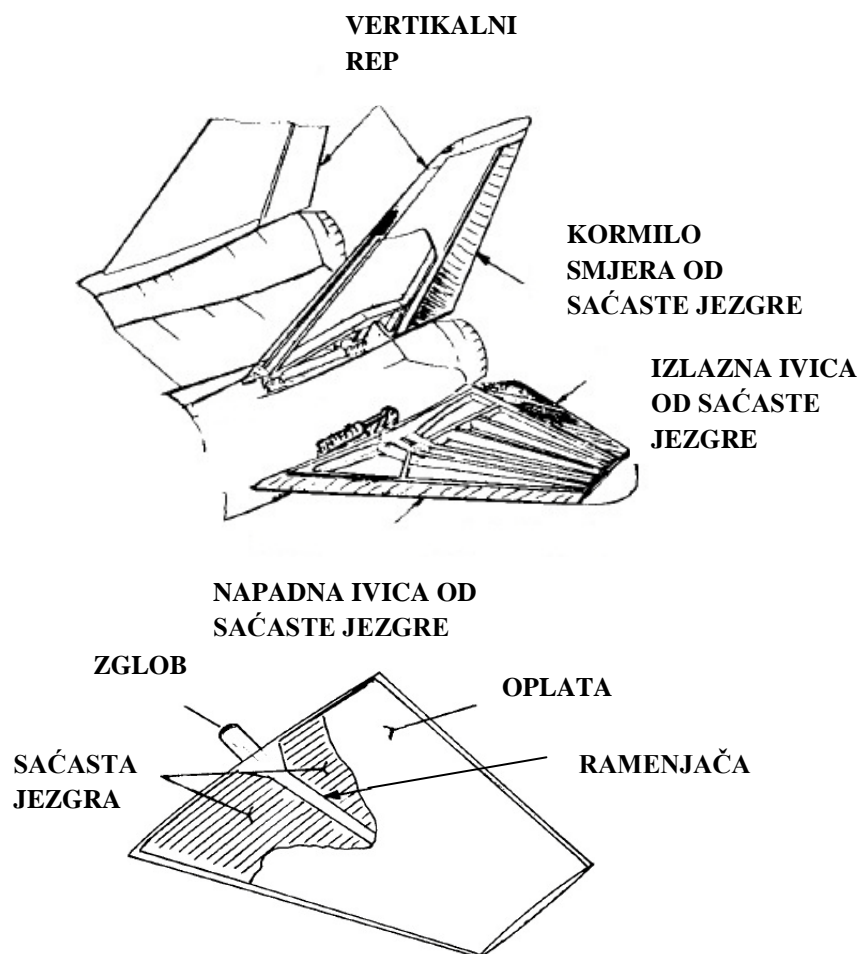
**Slika 4.** Shema postupka izrade saćaste šesterokutne jezgre prije ekspanzije (HBOE engl. *Honeycomb before expansion*) [9]

Kod papirnatih saća, blok zalijepljenih papirnatih listova pažljivo se širi kako bi oblikovao veliki blok saća debljine nekoliko desetaka centimetara. Zadržavajući ga u raširenom obliku, ovaj krhki sloj papirnatih saća uranja se u spremnik sa polimerom, cijedi i zatim suši u peći.

Kada je ocijeđen polimer polimerizirao blok saća dovoljne čvrstoće reže se na konačnu debljinu.

Mijenjanjem stupnja razvlačenja u procesu širenja jezgri mogu se dobiti šesterokutne ili izdužene jezgre, svaka različitih mehaničkih svojstava. Zbog ovih postupaka spajanja saće će imati različita svojstva u smjeru struka ( $0^0$ ) i smjeru okomitom na struk ( $90^0$ ). Čelije saća također se mogu ispuniti pjenom. To omogućuje veću površinu za spajanje kora, bolja mehanička svojstva jezgre zbog stabiliziranja zidova ćelija te bolja akustična i toplinska izolacijska svojstva. Svojstva saća ovise o veličini ćelija (stoga i o frekvenciji ćelija) i debljini i čvrstoći zidova. Tipična debljina listova je od 3 do 5 mm a dimenzije panela su 1200 x 2400 mm iako mogu biti do veličine 3000 x 3000 mm.

Sačastim jezgrama moguće je dobiti vrlo krut i lagan kompozit, ali zbog male površine za spajanje kora gotovo uvijek se koriste sa sustavima polimera visokih svojstava kao što su epoksidni kako bi se dobila odgovarajuća čvrstoća spoja sa laminatnim korama. Primjena sačastih jezgri na konstrukciji borbenog zrakoplova F – 14 prikazana je na slici 5.



**Slika 5. Primjena saćastih jezgri kod konstrukcije "leteći rep" zrakoplova F – 14 [8]**

- **Aluminijske saće**

Aluminijske saće imaju najveći omjer čvrstoće i težine od bilo kojeg strukturnog materijala. Svojstva im variraju ovisno o debljini lima i veličini saća. Unatoč svojim dobrim mehaničkim svojstvima i relativno niskoj cijeni, nedostatak aluminijskih saća je mogućnost pojave korozije. Treba paziti da aluminij ne dođe u kontakt sa ugljikom jer može doći do pojave galvanske korozije. Nedostatak je također i plastična deformacija jezgre koja se može javiti pri većim opterećenjima.

- **Saće od NOMEX – a**

Ove saće izrađene su od takozvanog NOMEX papira koji se sastoji od aramidnih vlakana impregniranih sa fenolnim polimerom. Ovakva struktura daje visoku mehaničku čvrstoću i vatrootpornost uz malu masu, što je jedan od važnih zahtjeva na materijale u zrakoplovstvu. Primjena u zrakoplovstvu je za izradu vrlo laganih i čvrstih podnih panela, dijelova kućišta motora, krilaca, napadne ivice krila i dijelova repa.

- **Plastomerne saće**

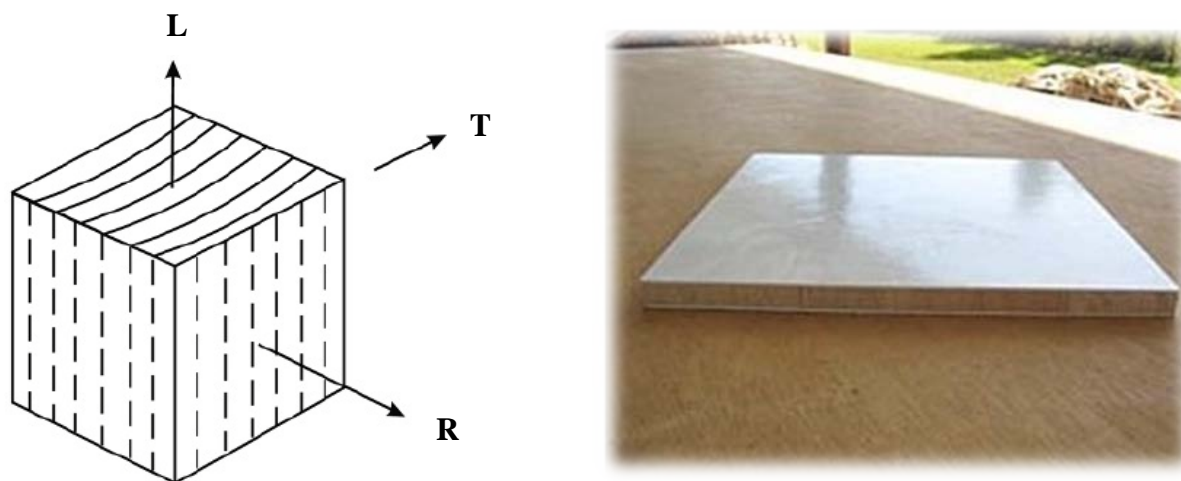
Jezgre od plastomera vrlo su lagane i mogu se lako reciklirati. Glavni nedostatak im je slaba veza između jezgre i kora te vrlo mala krutost. Najčešće korišteni polimeri su : ABS, polikarbonat, polipropilen i polietilen.

- **Drvo**

Drvo ima prirodnu sačastu strukturu na mikroskopskoj razini. Kada se koristi u sendvič kompozitima sa ravnom godova okomitom na ravninu kora, ovakva jezgra ima svojstva kao i umjetne saće. Iako danas postoje različite zaštite za drvo, ono je i dalje izrazito osjetljivo na vlagu i podložno je truljenju ako ga se pravilno ne zaštiti polimerom ili laminatima. Najčešće korištene drvene jezgre su od balze i cedra.

- **Balza**

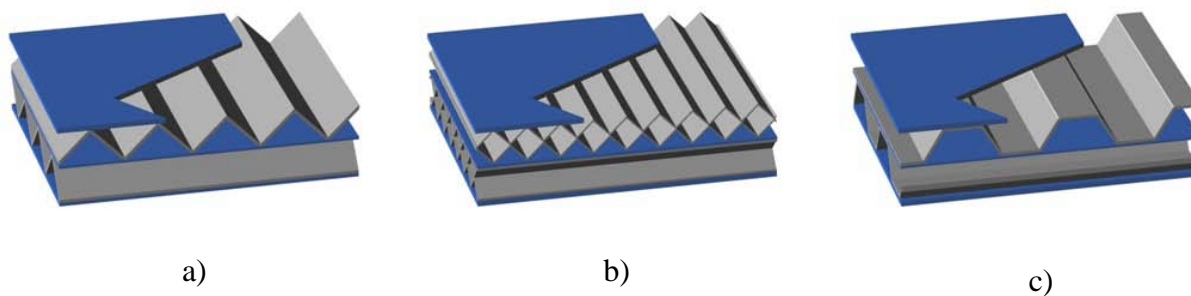
Najčešće korištena drvena jezgra je balza. Prednost balze su visoka tlačna čvrstoća, dobra toplinska izolacija i apsorpcija zvuka te mala gustoća. Balza se neće deformirati pri zagrijavanju i služi kao zaštitni sloj pri pjeni požara jer sporo izgara. Kao rezultat jednosmjerne orijentacije vlakana u L – smjeru balza je jako anizotropna, sa mnogo većom krutošću u longitudinalnom (L) nego radijalnom (R) i tangencijalnom (T) smjeru prikazanim na shemi, slika 6. Debljina jezgri od balze mjeri se u L – smjeru. Izgled sendvič kompozita sa jezgrom od balze prikazan je na slici 6.



**Slika 6. Jezgra od balze : a) Shema [2]; b) Izgled sendvič kompozita [10]**

#### 2.2.2.2. Korugirane jezgre

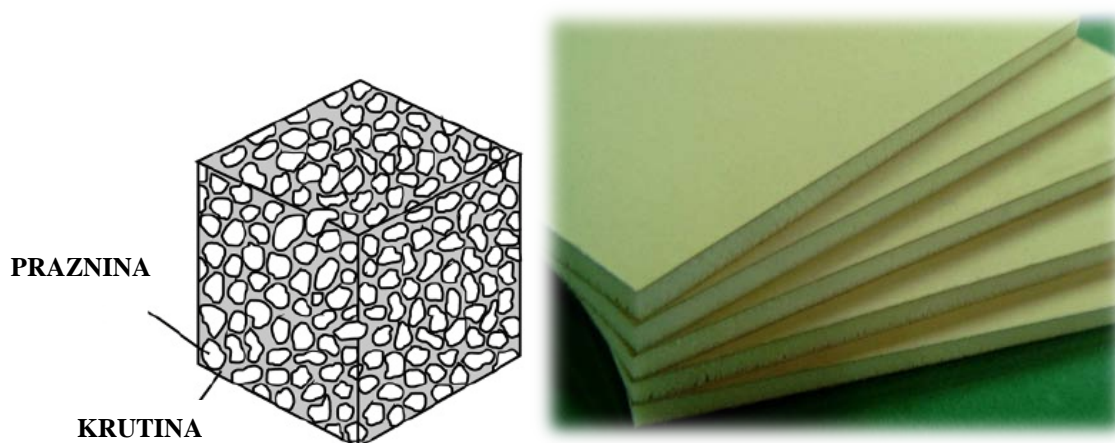
Tipičan primjer korugiranih jezgri je kartonska kutija kod koje su kore i jezgra od istog materijala. Najčešće se u zrakoplovstvu upotrebljava jezgra i kore od aluminijskog lima zbog male mase i visoke krutosti. Ovakve jezgre rijede se upotrebljavaju u civilnom zrakoplovstvu ali su česte kod oplata krila borbenih zrakoplova [8]. Krutost ovih jezgri ovisi o materijalu od kojeg su napravljene kao i geometriji. Zbog tih razloga teško je predvidjeti mehanička svojstva. Tipični oblici korugiranih jezgri prikazani su na slici 7.



**Slika 7. a) Korugirana jezgra; b) „Dijamantno“ korugirana jezgra c) „Web“ jezgra [9]**

### 2.2.2.3. Pjenaste jezgre

Pjene su najčešće korišteni materijal jezgri. Mogu se izrađivati od sintetičkih polimera kao što su polivinil klorid (PVC), polistiren (PS), poliuretan (PU), polimetil metakrilamid (akril), politerimid (PEI) i stirenakrilonitril (SAN). Također se koriste metalne pjene i u posljednje vrijeme pjene od ugljika. Svojstva ovih jezgri ovise o materijalu od kojeg je napravljena pjena i veličini praznina koje uzrokuju nehomogenost jezgre, slika 8. Ove jezgre dostupne su u različitim debljinama i gustoćama. Izgled pjenaste jezgre i sendvič kompozita prikazan je na slici 8.



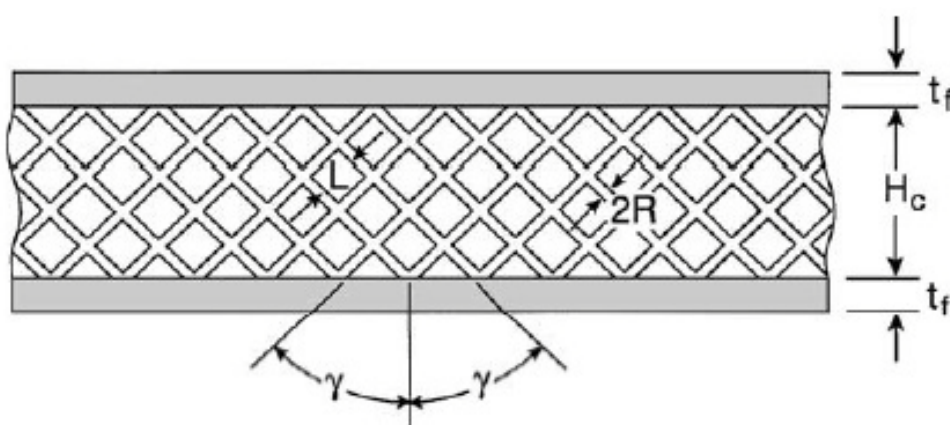
**Slika 8. Pjenasta jezgra : a) Shema [2]; b) Izgled sendvič kompozita [11]**

### 2.2.2.5. Rešetkaste jezgre

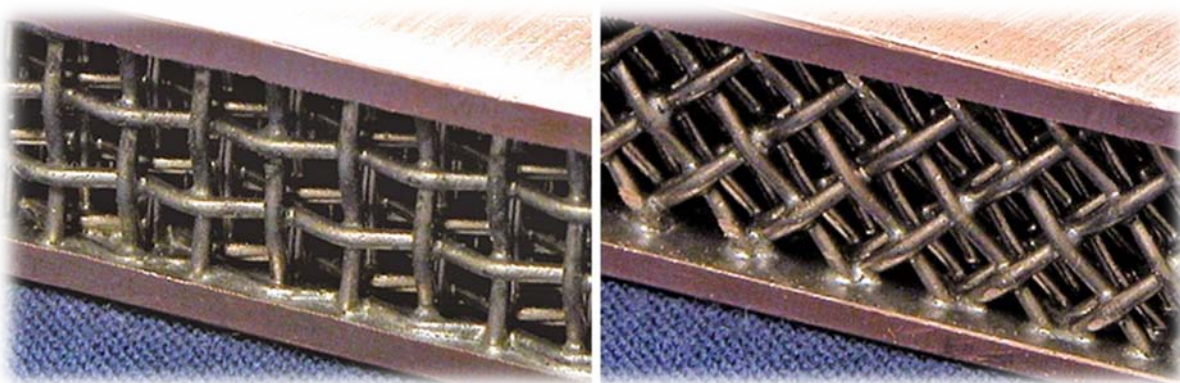
Rešetkaste jezgre sastoje se od dva vanjska sloja (kora) debljine  $t_f$  i jezgre debljine  $H_c$ . Jezgra i kore napravljene su od istog materijala. Žice od kojih se sastoji jezgra imaju radijus  $R$  i međusobno su udaljene za  $L$ , slika 9 a). Udaljenost između slojeva žice mjereno okomito na ravninu slike 9 a) je  $2\alpha R$  gdje je faktor  $\alpha \approx 2$  [12]. Optimalna svojstva ovakvih jezgri su kod kuteva  $\gamma = \pm 45^\circ$ . Žice su dobro pričvršćene međusobno i za vanjske slojeve. Mjesta



pričvršćenja žica između susjednih slojeva nisu pravilno razmaknuta kako bi se izbjeglo izvijanje kora. Kod ovakve konstrukcije moguće je izvijanje jezgre i odvajanje vanjskih slojeva. Rešetkaste jezgre imaju malu masu i dobro podnose savojna i smična opterećenja. Relativno su noviji tip tako da se neka mehanička svojstva kao i modovi pucanja još uvijek ispituju. Ovakve jezgre često se upotrebljavaju za izradu izmjenjivača topline koji se upotrebljavaju na mjestima gdje je potrebno izmijeniti velike količine toplinske energije na relativno malom prostoru [9], slika 9 b).



a)



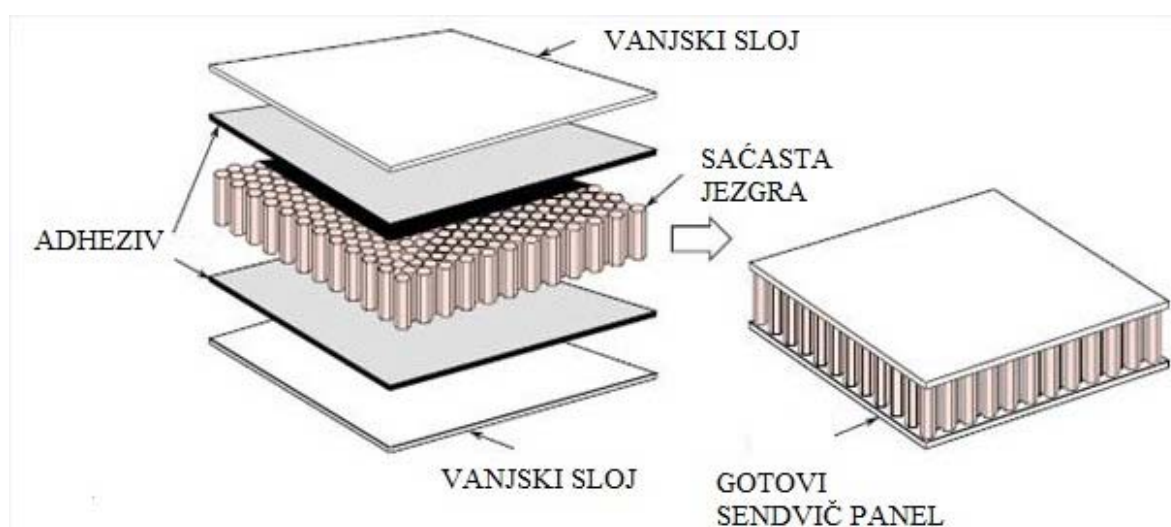
b)

**Slika 9.a) Shema sendvič kompozita od rešetkaste jezgre [12]; b) Izgled izmjenjivača topline od rešetkaste jezgre [9]**

**Tablica 2.** Mehanička svojstva saćaste jezgre.  $\rho$  = gustoća,  $G$  = modul smicanja,  $S$  = smična čvrstoća,  $W$  - smjer,  $L$  – smjer [2]

Materijal	$\rho$ $g/cm^3$	$G_L$ $N/mm^2$	$G_W$ $N/mm^2$	$S_L$ $N/mm^2$	$S_W$ $N/mm^2$
Papir	0.056	141	38	1.3	0.48
Aluminij	0.070	460	200	2.2	1.50
Nomex	0.080	69	44	2.2	1.00
Nomex	0.129	112	64	3.2	1.70

### 2.3. Konstrukcija sendvič kompozita sa saćastom jezgrom



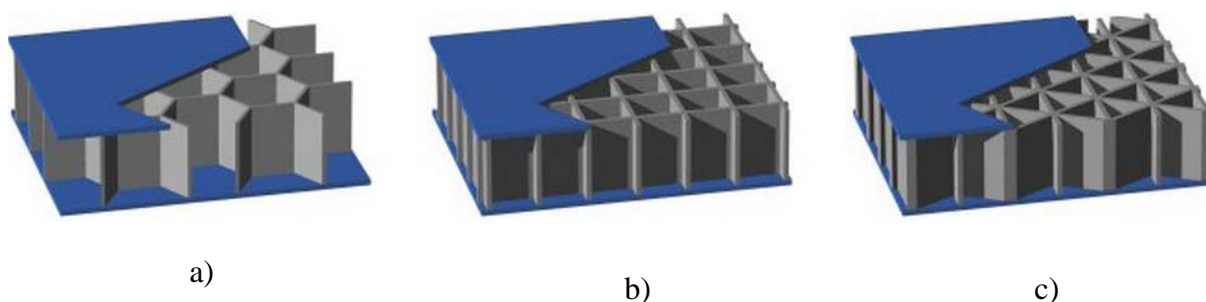
**Slika 10.** Konstrukcija sendvič kompozita sa saćastom jezgrom [13]

Sendvič kompoziti, kako je već naglašeno, sastoje se od jezgre koja može biti saćasta, puna, valovita ili korugirana i rešetkasta te kora koje mogu biti izrađene od tankih listova metala i papira, drveta te vlaknima ojačanih polimernih kompozita. Na slici 10 prikazana je saćasta

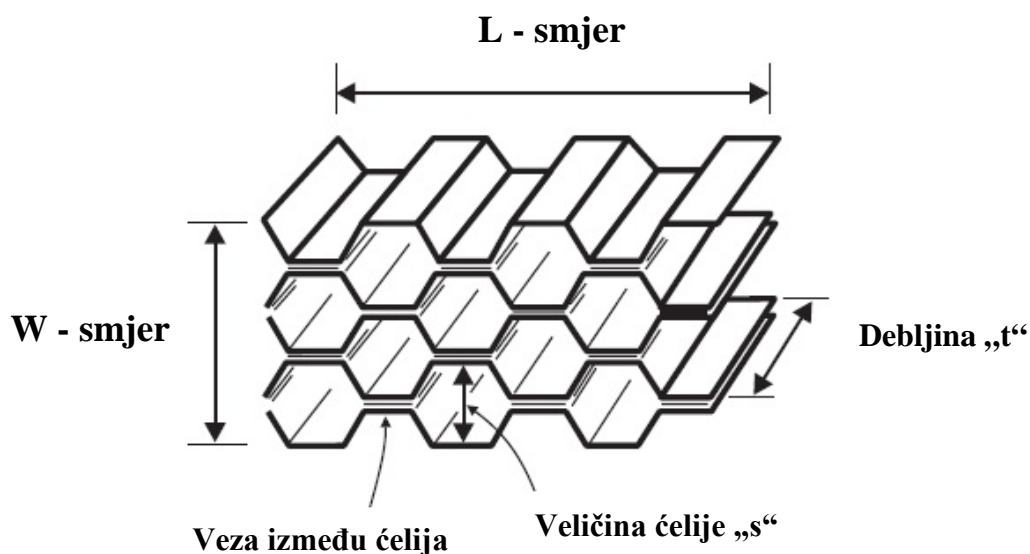


jezgra na koju se uobičajeno nanosi sloj adheziva za spajanje sa korama kada se radi o nemetalnim jezgrama ili se jezgra spaja sa korama laserskim zavarivanjem i lemljenjem ako je izrađena od metala.

Ćelije saća izrađene su od listova metala ili nemetala koji tvore bokove ćelija. Ćelije mogu biti poslagane tako da tvore trokutaste, pravokutne i šesterokutne oblike, slika 11. Postupci proizvodnje šesterokutnih ćelija dovode do podebljanja bokova na mjestima spajanja susjednih ćelija, slika 12, što uzrokuje anizotropna svojstva jezgre. Svojstva saćastih jezgri obično se definiraju u odnosu na W i L orijentaciju ćelija, slika 12.



**Slika 11.** Vrste ćelija sendvič kompozita : a) Šesterokutne; b) Pravokutne; c) Trokutaste; [9]



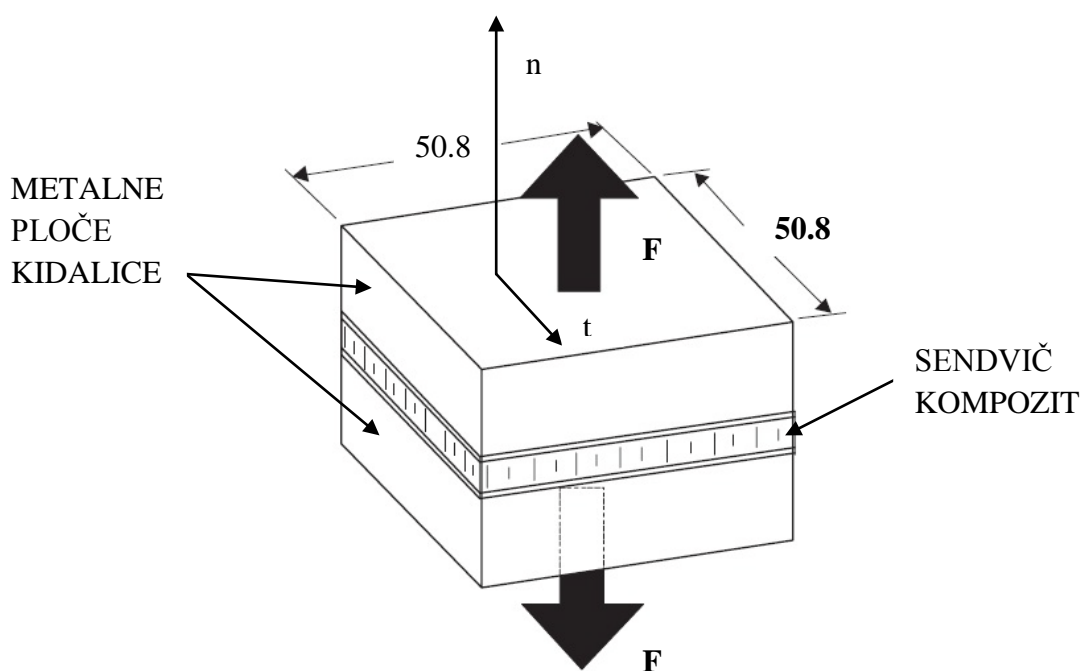
**Slika 12.** Shema šesterokutne jezgre [14]

### 3. Vrste opterećenja sendvič kompozita

Sendvič kompoziti mogu biti opterećeni na vlak, tlak, savijanje, torziju i smik. Opterećenja koja će biti obrađena u nastavku su vlak, tlak i savijanje. Opterećenja koja se javljaju tijekom leta zrakoplova dinamička su, tako da su i dijelovi izrađeni od sendvič kompozita opterećeni dinamički.

#### 3.1. Vlačno opterećenje

Pri vlačnom opterećenju sendvič kompozita do izražaja dolazi vlačna čvrstoća jezgre i jačina veze između jezgre i kora. Ako se radi o vlaknima ojačanom PMC – u, vlakna kod ovakvog načina opterećenja ne nose jer je smjer opterećenja okomit na smjer vlakana. Smjer tangente i normale na kore sendvič kompozita prikazani su na slici 13. Kod vlačnog opterećenja može doći do pucanja bokova ćelija, ako je veza između jezgre i kora dovoljno jaka, ili do odvajanja kore od jezgre ako je spoj adheziva slabiji. Ovakvo ispitivanje se obično izvodi na kidalici gdje su kore sendviča pričvršćene za metalne ploče koje se razvlače, slika 13. Dimenzije ispitnih uzoraka su obično 50.8 x 50.8 mm.



Slika 13. Vlačno opterećenje sendvič kompozita u smjeru normale  $n$  [15]

Vlačna čvrstoća sendvič kompozita može se izračunati iz jednačbe :

$$\sigma = \frac{F}{lw} \quad (4)$$

gdje je :

F – ukupno opterećenje

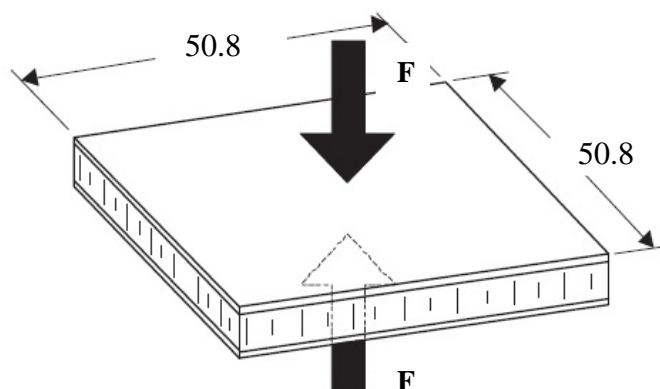
l – duljina uzorka (50.8 mm)

w – širina uzorka (50.8 mm)

### 3.2. Tlačno opterećenje

#### 3.2.1. Tlačno opterećenje u smjeru normale

Čvrstoća ovako tlačno opterećenog sendviča ovisi također o svojstvima jezgre jer je ona glavni nositelj tlačnih opterećenja koja se prenose sa kora, slika 14. Tlačno opterećenje uzrokuje izvijanje bokova ćelija saća. Kod nemetalnih saća do izražaja dolazi tehnologija izrade zbog toga što polimer koji se kapilarno upio iz kora na zidove saća dodatno ojačava ćelije i povećava otpornost na izvijanje.

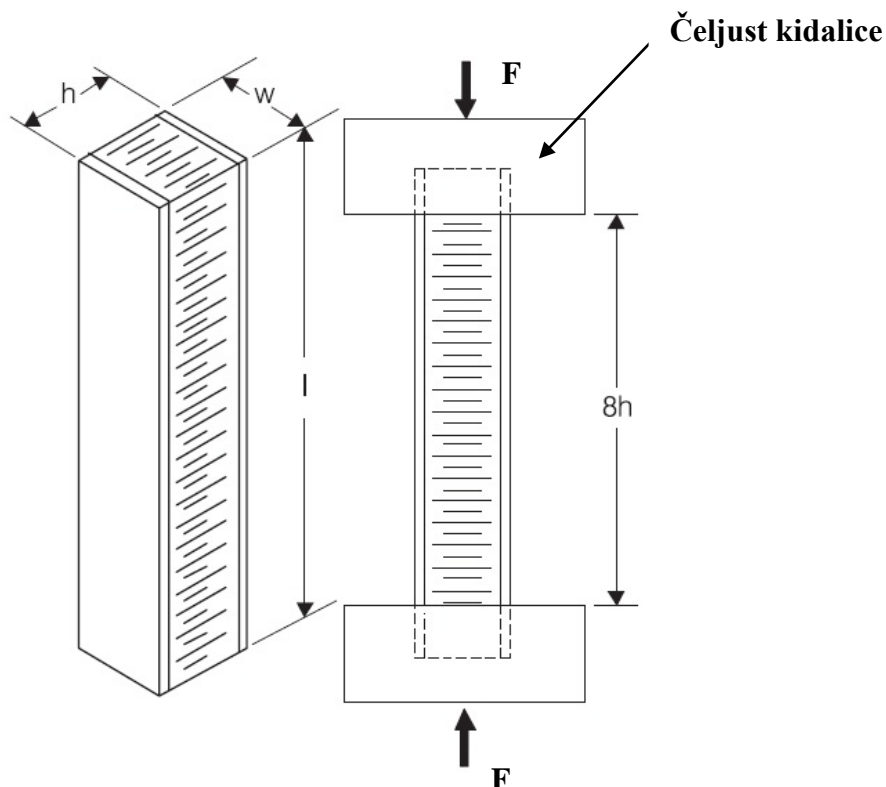


Slika 14. Tlačno opterećenje sendvič kompozita u smjeru normale n [15]

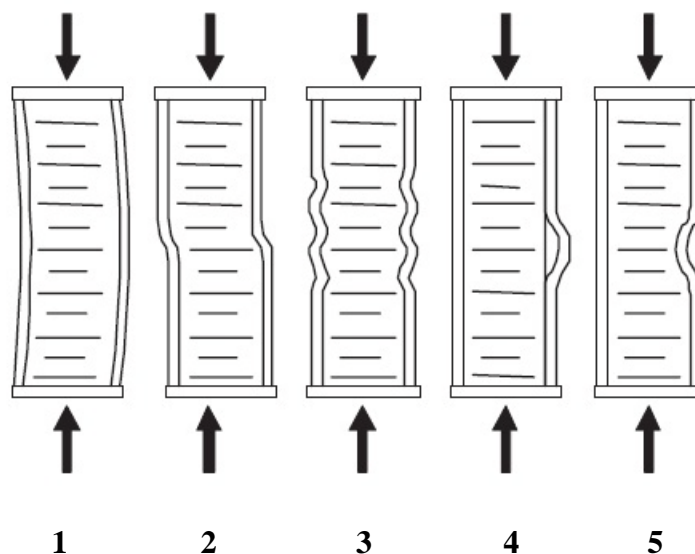
Tlačna čvrstoća također se može izračunati iz jednadžbe (4).

### 3.2.2. Tlačno opterećenje u smjeru tangente

Čvrstoća tlačno opterećenog sendviča u smjeru tangente ovisi o tlačnoj čvrstoći materijala od kojeg su izrađene kore. Kod ovakvog načina opterećenja jezgra vrlo malo doprinosi ukupnoj čvrstoći sendviča jer naprezanja djeluju okomito na bokove ćelija, slika 15. Unatoč tome, ukupna čvrstoća će se razlikovati ovisno da li opterećenje djeluje u L ili W smjeru ćelija, slika 12. Pri ovakvom opterećenju najčešće dolazi do izvijanja i pucanja vanjskih slojeva kore. Izvijanje može biti lokalno što se manifestira kao izvijanje slojeva kore izneđu šupljina ćelija ili globalno. Do lokalnog izvijanja dolazi kod tanjih slojeva kore i čvršće jezgre. Mogući oblik pucanja je i takozvano „drobljenje“ vanjskih slojeva kada ne dolazi do izvijanja sendviča već se jezgra tlači a vanjski slojevi popuštaju pri čemu se sendviču mijenja samo duljina. Na slici 16 prikazani su razni modovi pucanja pri tlačnom opterećenju uzoraka sendvič kompozita.



Slika 15. Tlačno opterećenje sendvič kompozita u smjeru tangente  $t$  [15]

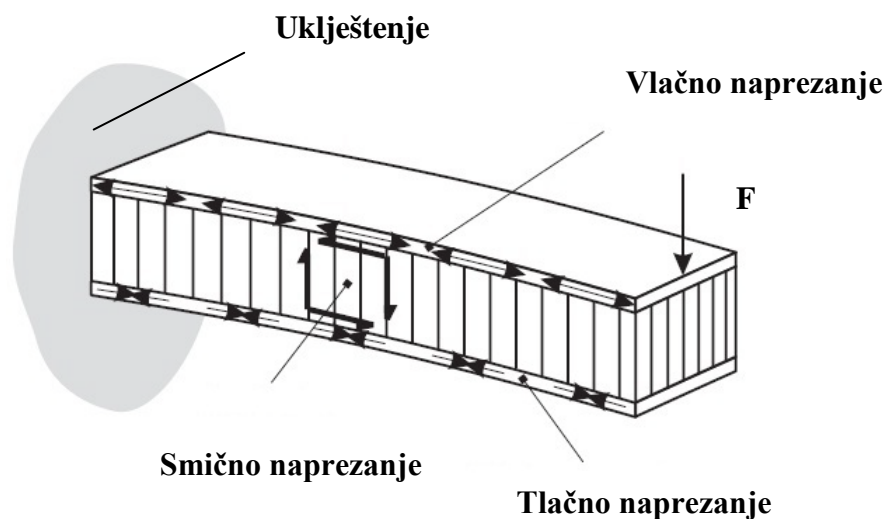


**Slika 16.** Modovi pucanja pri tlačnom opterećenju : 1 – izvijanje, 2 – smicanje jezgre, 3 – lokalno izvijanje kora, 4 – boranje kora : odvajanje od jezgre, 5 – boranje kora : drobljenje jezgre

### 3.3. Savijanje

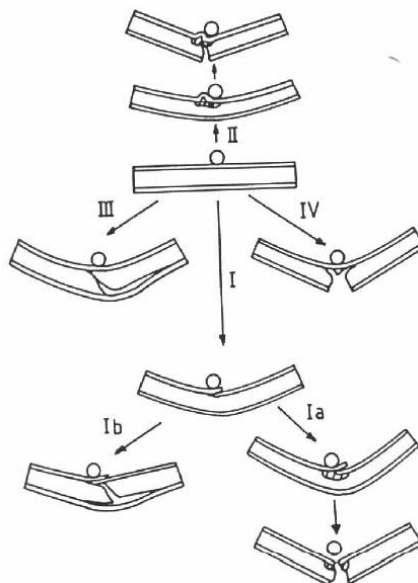
Komponente u zrakoplovstvu izrađene od sendvič kompozita kao što su dijelovi krila, repa i stabilizatora, podni paneli i dijelovi trupa, također su opterećene na savijanje. Čvrstoća savojno opterećenih sendvič kompozita ovisi o više faktora. Orijentacija vlakana, njihova vlačna čvrstoća, tlačna i vlačna čvrstoća vanjskih slojeva, kvaliteta polimerne matrice i čvrstoća veze između jezgre i kora, orijentacija ćelija jezgre (W, L - smjer) i njena smična čvrstoća samo su neki od njih. Također je potrebno naglasiti da na čvrstoću utječe i postupak izrade odnosno primjenjena tehnologija te način rukovanja vlaknima.

Prilikom savijanja sendvič kompozita u vanjskim slojevima javljaju se vlačna odnosno tlačna naprezanja, dok je jezgra opterećena na smik, slika 17. Posljedica ovakve raspodjele naprezanja su različiti modovi pucanja.



**Slika 17.** Savijanje sendvič kompozita [15]

Rezultatima ispitivanja savojne čvrstoće sendvič kompozita sa jezgrama od aluminijskih saća i Coremat - a (poliesterska vlakna impregnirana polimerom) te korama od staklenih (CSM engl. *Chopped strand mat*), ugljičnih i aramidnih vlakana u epoksidnoj i poliesterskoj matrici, utvrđena su četiri moda pucanja, slika 18, [16]. (I) pucanje gornje kore usljed tlačnih naprezanja nakon čega slijedi drobljenje jezgre i zatim pucanje donje kore usljed vlačnih naprezanja ili smicanje jezgre, (II) drobljenje gornjeg sloja, (III) smicanje jezgre, (IV) pucanje donje kore usljed vlačnih naprezanja.



**Slika 18. Modovi pucanja sendvič kompozita opterećenog na savijanje : (I) pucanje gornjeg sloja, (II) drobljenje gornjeg sloja, (III) smicanje jezgre, (IV) pucanje donjeg sloja [16]**

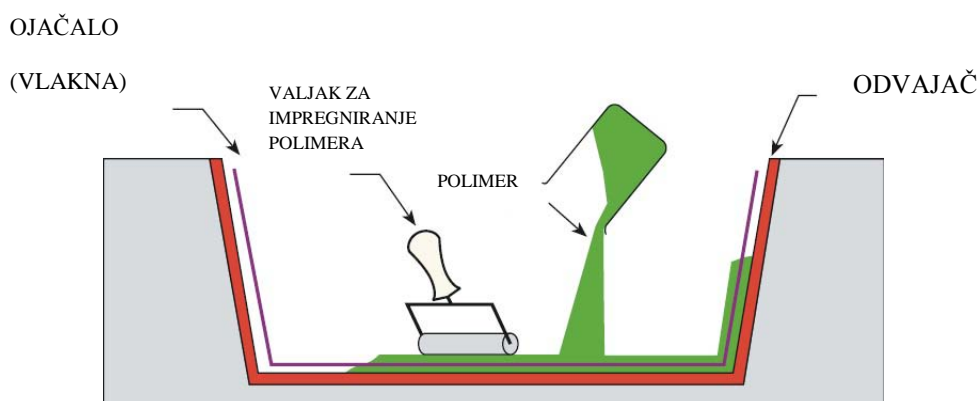
Kod uzoraka sa vanjskim slojevima napravljenim od tkanja ugljičnih i staklenih vlakana te CSM – a, pojavljuje se (I) mod pucanja; tlačna čvrstoća slojeva niža je od vlačne čvrstoće (gornja kora puca usljed tlačnih naprezanja i ne nabora se). Uzorci sa slojevima od aramidnog tkanja i Coremat jezgre imaju mod pucanja (II), kao rezultat slabe tlačne čvrstoće aramida. CSM slojevi i Coremat jezgra ponašaju se kao mod (IV) jer je vlačna čvrstoća CSM – a manja od tlačne. Na kraju uzorci koji se sastoje od slojeva kombinacije tkanje/CSM staklenih vlakana i Coremat jezgre ponašaju se prema (I) i (III) modu pucanja, gdje je mod (III) uzrok slabije veze između jezgre i vanjskih slojeva.

Kako je spomenuto, pojava određenog moda pucanja kod sendvič kompozita također ovisi o tehnologiji izrade i uvjetima umrežavanja odnosno polimerizacije korištene matrice te njenoj kvaliteti. Ako je umrežavanje provedeno u više postupaka i pri različitim temperaturama kvaliteta veze između kora i jezgre je bolja a time i čvrstoća sendvič kompozita veća. Vlaga ima veliki utjecaj na adheziv odnosno polimer u ovom slučaju, tako da se danas ulažu veliki naponi kako bi se što manje vlage iz zraka upilo prilikom postupka izrade sendvič kompozita.

## 4. Proizvodni postupci za izradu sendvič kompozita

Postoji više tehnologija izrade sendvič kompozita. Svaka od njih primjenjuje se u ovisnosti o području primjene i željenim svojstvima. Pri izradi sendvič kompozita od NOMEX– a u ovom radu korištene tehnologije su ručno laminiranje u otvoreni kalup - „*wet lay-up/hand lay-up*“ i vakumiranje - „*vacuum bagging*“ a biti će ukratko opisana i autoklava - „*autoclave process*“.

### 4.1. Ručno laminiranje u otvoreni kalup („*wet lay-up/hand lay-up process*“)



Slika 19. Ručno laminiranje u otvoreni kalup

#### Opis postupka

Polimer se kod ovakvog načina proizvodnje ručno impregnira u vlakna (aramidna, ugljična staklena) koja mogu biti u obliku različitih vrsta tkanja ili pletiva. Za impregniranje se obično koriste valjci, četke i plastične „špahtle“, slika 19. Polimer se prethodno dobro izmješa sa otvrdnjivačem u određenom omjeru, u ovom slučaju 100 : 30 i zatim se premazuje preko tkanja od ugljičnih vlakana pomoću „špahtle“, slika 20. Pri tome je potrebno obratiti pažnju na pritisak jer je vlakna moguće razdvojiti i tako narušiti svojstva na tome mjestu. Moguće je koristiti odvajач ako se radi u kalupu zbog lakšeg odvajanja vlakana nakon polimerizacije matrice. Dodatno je korištena PE vreća koja je omogućila bolju impregnaciju polimera i lakše



rukovanje. Proces se ponavlja ovisno o željenoj debljini kora. Ovdje su korištena četiri sloja tkanja ugljičnih vlakana. Na zadnji sloj tkanja stavlja se upijajuća tkanina takozvani „*Peel ply*“ ili „*abrajz*“ koji služi za upijanje viška istisnutog polimera i dobivanja hrapavije površine. Kore se zatim režu na određenu dimenziju ovisno o veličini jezgre.



**Slika 20. Izrada kora sendvič kompozita**

- **Ostvarivanje tlaka**

Prethodnim postupkom dobivene kore stavlja se na jezgru od NOMEX – a koja se zatim polaže između dvije površine preko kojih se ostvaruje tlak. Za izradu kora u ovom radu korištene su dvije staklene ploče. Sila potrebna za ostvarivanje pritiska i spajanje kora sa jezgrom dobivena je postavljanjem utega mase 20 kg na staklenu površinu. Tlak koji djeluje na ploču iznosi 2458 Pa i može se izračunati iz jednadžbe :

$$p = \frac{F}{A} = \frac{20 \cdot 9.80665}{0.38 \cdot 0.21} = 2458 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (5)$$

Gdje je :

- $F = m \cdot g$ , težina utega
- $A$  (380 x 210 mm) površina staklene ploče

- **Prednosti**

- Jednostavan i brz proces
- Niska cijena potrebne opreme
- Koristi se dugi niz godina
- Širok izbor dobavljača opreme i materijala
- Veći udio vlakana naspram drugih postupaka

- **Nedostaci**

- Kvaliteta laminata, udio i miješanje polimerne matrice ovise o vještini osobe. Postizanje malog udjela polimera obično se ne može postići bez dodatnog unosa vlage
- Zdravstveni i sigurnosni uvjeti pri radu sa polimerom. Mali viskozitet polimera znači da može lakše prodrijeti kroz odjeću
- Osiguranje ventilacije prostorija zbog lebdećih čestica stirena poliesterskih i vinilesterskih matrica
- Polimer treba biti što nižeg viskoziteta zbog lakše ručne obrade i prodiranja između vlakana što znači i veći udio otapala odnosno štetnog stirena
- Vlakna i polimerna matrica zahtijevaju pažljivo rukovanje kako bi se dobila željena svojstva

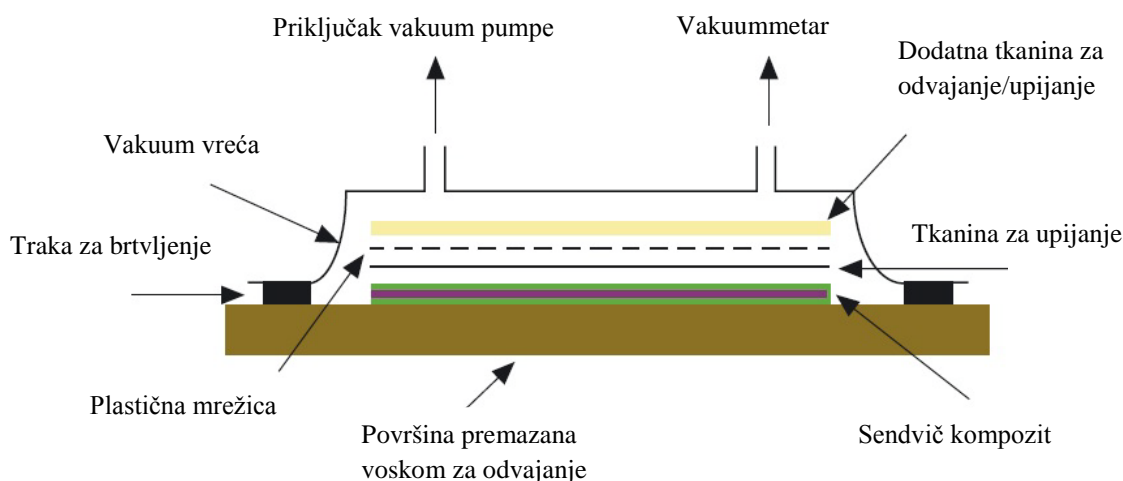
- **Odabir materijala**

Polimeri : Moguće je koristiti bilo koje npr. epoksidne, poliesterske, vinilesterske i fenolne.

Vlakna : Bilo koji tip vlakana iako aramidna vlakna mogu predstavljati poteškoće zbog teže impregnacije polimera.

Jezgre : Svi tipovi jezgri.

## 4.2. Vakuumiranje („*Vacuum bagging process*“)



**Slika 21. Vakuumiranje**

### Opis postupka

Proces vakuumiranja zapravo je nastavak na prethodno opisani proces ručnog laminiranja. Kod vakuumiranja se za ostvarivanje tlaka, potrebnog za spajanje kora sa jezgrom sendviča, koristi PE vakuum vreća koja „pritišće“ vanjske slojeve i istiskuje višak polimera, slika 21. Postupak pripreme tkanja ugljičnih vlakana i mješavine polimera i otvrdnjivača identičan je kao u prethodnom opisanom postupku tako da se ovdje neće ponavljati. Nakon što su izrađene kore i izrezane na zadane dimenzije te postavljene na jezgru od NOMEX – a, dobiveni sendvič kompozit stavlja se u drveni okvir, slika 22, koji služi kao osiguranje od pre velikih sila na rubovima sendvič kompozita koje bi mogle oštetiti odnosno zdrobiti jezgu. Pri izradi okvira mora se obratiti pažnja na oštre rubove koji se moraju izgladiti kako se ne bi probušila vakuum vreća. Okolo okvira postavlja se ljepljiva traka koja služi za pričvršćivanje vakuum vreće za staklenu površinu i osiguranje brtvljenja. Na sloj kora sa gornje strane postavlja se plastična mrežica koja omogućava bolje izvlačenje viška polimera i osigurava da se vakuum vreća ne zalijepi za kore. Vakuum se ostvaruje preko električne pumpe izvlačenjem zraka iz prostora između vakuum vreće i kora i iznosi 150 mbar (cca 85 % vakuum). Kod ovog procesa poželjno je da slojevi budu što više natopljeni polimerom jer će se on kapilarno upiti

uz zidove ćelija i tako povećati tlačnu i smičnu čvrstoću jezgre. Također se vakuumom ostvaruje bolja impregnacija vlakana polimerom nego kod procesa sa tlakom što također utječe na ukupnu čvrstoću sendvič kompozita.



**Slika 22. Proces vakuumiranja sendvič kompozita**

- **Ostvarivanje sile**

Sila potrebna za spajanje kora i jezgre sendvič kompozita ostvarena je pritiskom vakuum vreće i iznosi 6344.8 N i također se može izračunati iz jednadžbe (5).

$$F = p \cdot A = 86325 \cdot (0.35 \cdot 0.21) = 6344.8 \text{ N}$$

- **Prednosti**

- Mogućnost dobivanja laminata sa većim udjelom vlakana nego kod procesa sa otvorenim laminiranjem
- Manji udjeli praznina ispunjenih zrakom nego kod otvorenog laminiranja
- Bolja impregnacija vlakana polimerom zbog vakuuma
- Sigurniji i zdraviji proces jer vakuum vreća smanjuje količinu čestica stirena u zraku tijekom polimerizacije

- **Nedostaci**

- Skuplji proces od otvorenog laminiranja
- Zahtijeva više znanja i vještine
- Miješanje i sadržaj polimera u korama također ovise o vještini

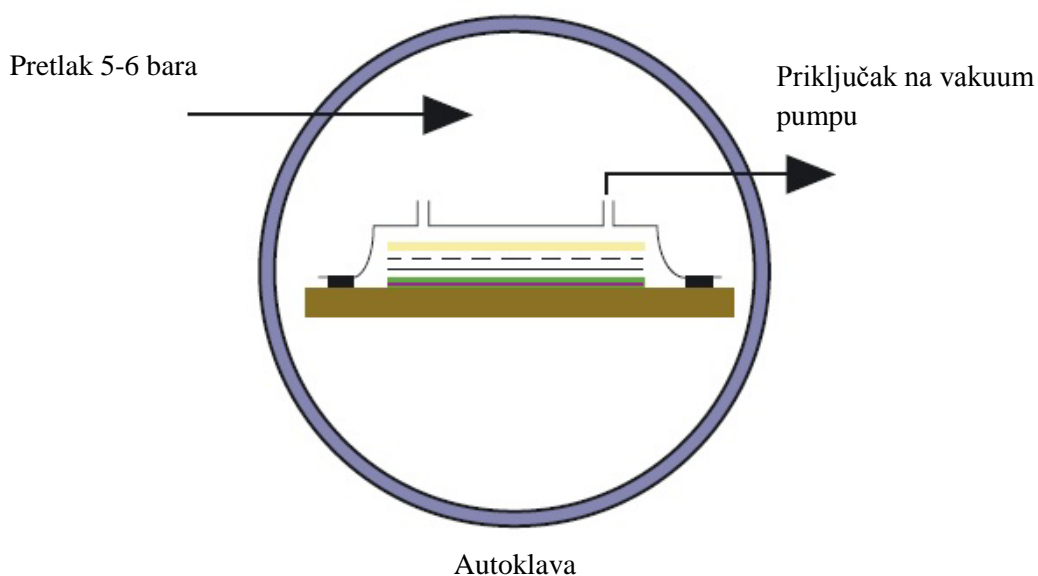
- **Odabir materijala**

Polimeri : Uglavnom se koriste fenolni i epoksidni. Poliesterski i vinilesterski mogu uzrokovati povećanu koncentraciju para stirena zbog izvlačenja vakuum pumpe.

Vlakna : Mogu se koristiti razna vlakna zbog tlaka koji osigurava dobru impregnaciju polimera.

Jezgre : Svi tipovi jezgri.

#### 4.3. Autoklava („Autoclave process“)



**Slika 23. Autoklava**

## Opis postupka

Vlakna i tkanja se predimpregniraju kod proizvođača pod djelovanjem temperature i tlaka sa kataliziranim polimerom. Katalizator omogućava rukovanje preprezima do nekoliko tjedana pa čak i mjeseci nakon što se odmrznu. Zamrzavanje preprega se koristi kako bi im se produljio životni vijek na skladištu. Preprezi se postavljaju ručno ili strojno na kalup tj. jezgru te se na njih postavlja vakuum vreća i zatim se zagrijavaju na obično  $120 - 180^{\circ}\text{C}$ . To omogućava polimernoj matrici da ponovno dođe u tekuće stanje i eventualno polimerizira. Dodatni tlak kod ovog procesa izrade ostvaruje se autoklavom (peć pod tlakom) kojom se može postići 5 - 6 bara pretlaka, slika 23.

- **Prednosti**

- Udio polimera u vlaknima precizno je definiran od proizvođača. Moguće je postići veći udio vlakana sa manje praznina nego kod prethodnih postupaka.
- Uvjeti u kojima se radi su povoljniji za zdravlje i sigurniji te je moguće automatizirati proces i tako uštediti na vremenu i radu.
- Polimer se može optimizirati zbog boljih mehaničkih i toplinskih svojstava i moguće je koristiti polimere većeg viskoziteta zbog primjenjene tehnologije.
- Dulje raspoloživo vrijeme za rad (do nekoliko mjeseci pri sobnoj temperaturi) omogućuje izradu kompleksnijih oblika površina.

- **Nedostaci**

- Cijena materijala za predimpregnirana tkanja je veća i obično je potrebno koristiti skuplje i kvalitetnije polimere.
- Za polimerizaciju potrebne autoklave koje su skupe, spore za rukovanje i ograničene veličine.
- Oprema koja se koristi mora moći izdržati temperaturu i jezgra mora izdržati tlak i temperaturu u autoklavi.

- **Odabir materijala**

Polimeri : Općenito epoksidni, poliesterski, fenolni i visokotemperaturni polimeri kao što su poliamidi, cianat esteri i bismaleimidi.

Vlakna : Svi tipovi vlakana i tkanja.

Jezgre : Bilo koje jezgre iako se koriste specijalni tipovi pjenastih zbog povećane temperature i tlaka u autoklavi.

## 5. Izrada ispitnih uzoraka

Za izradu uzoraka, od prethodno opisanih tehnologija, koristilo se ručno laminiranje u otvoreni kalup i vakuumiranje. Postupci kojima su uzorci izrađeni su detaljno opisani u četvrtom poglavlju. Materijali koji su korišteni u izradi su jezgra od NOMEX – a, slika 24, čije su dimenzije i svojstva prikazani u tablici 3 i kore od „*plain*“ tkanja ugljičnih vlakana, slika 25. Kao adheziv i matrica za vlakna korišten je polimer na epoksidnoj bazi CR120 i otvrdnjivač CH120-3 koji su pomiješani u masenom omjeru 100:30.



**Slika 24.**      Saćasta jezgra od NOMEX – a

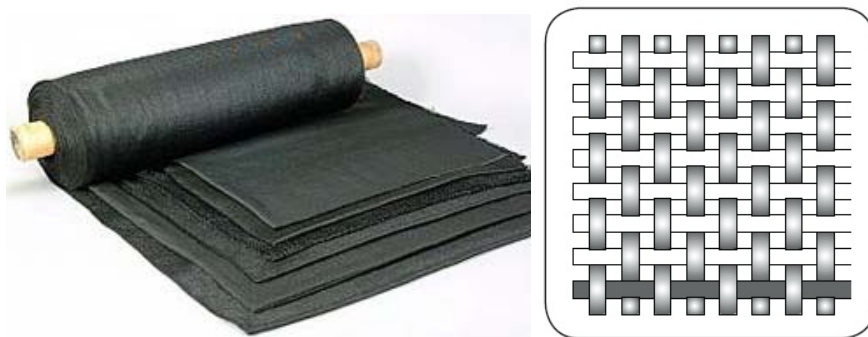


**Tablica 3.** Dimenzije i svojstva jezgre.  $\rho$  = gustoća,  $s$  = veličina ćelije,  $t$  = debljina jezgre,  $\sigma_t$  = tlačna čvrstoća,  $\tau_c$  = smična čvrstoća,  $G_c$  = modul smicanja,  $L$  - smjer,  $W$  – smjer [17]

Oznaka jezgre	$\rho$	$s$	$t$	$\sigma_t$	$\tau_{cL}$	$G_{cL}$	$\tau_{cW}$	$G_{cW}$
	kg/m <sup>3</sup>	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
ECA 3.2 – 48	48	3.2	10	2.10	1.32	48	0.72	30

- **Rezanje tkanine**

Pripremanje uzoraka započinje sa rezanjem osam pravokutnih uzoraka „plain“ tkanine iz bale. Kod ove vrste tkanja svako vlakno prolazi naizmjenično jedno ispod drugog, slika 25. Vlakna su postavljena pod kutem od  $0^\circ/90^\circ$ . Korištena su vlakna prema specifikaciji T 300 i njihova svojstva prikazana su u tablici 4. Tkanje je dobre postojanosti i prosječne poroznosti. Unatoč tome najteže se prilagođava zakrivljenim površinama od svih tkanja a visok stupanj nabiranja vlakana odražava se na lošija mehanička svojstva u usporedbi sa ostalim vrstama tkanja. Također se ovakav tip tkanja ne koristi u kombinaciji sa vlaknima veće mase zbog spomenutog nabiranja.



**Slika 25.** Plain tkanje korišteno u izradi uzorka

**Tablica 4. Svojstva ugljičnih vlakana**

Oznaka vlakana	Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>	Vlačni modul N/mm <sup>2</sup>	Istezanje %	Gustoća kg/m <sup>3</sup>	Promjer vlakna μm
T-300 ugljična vlakna	3530	230·10 <sup>3</sup>	1.5	1760	7

- **Priprema površine za laminiranje**

Uzorci laminata izrađeni su na staklenoj površini koja je prethodno namazana voskom za odvajanje. Vosak služi kako bi se uzorci mogli što lakše odvojiti od staklene površine. Korištena je staklena površina zbog dobivanja što ravnije površine ispitnih uzoraka, kako bi se izbjegla koncentracija naprezanja usljed eventualnih neravnina.

- **Priprema materijala matrice**

Materijal matrice je, kako je prethodno spomenuto, polimer na epoksidnoj bazi CR-120 i otvrdnjivač CH-120-3. Potrebno ih je dobro izmiješati u omjeru 100:30 pri čemu je korištena gramaska vaga, slika 26 a). Posebnu pažnju treba obratiti prilikom miješanja i vaganja komponenti jer točnost omjera uvjetuje propisane karakteristike polimera i uvjete polimerizacije.



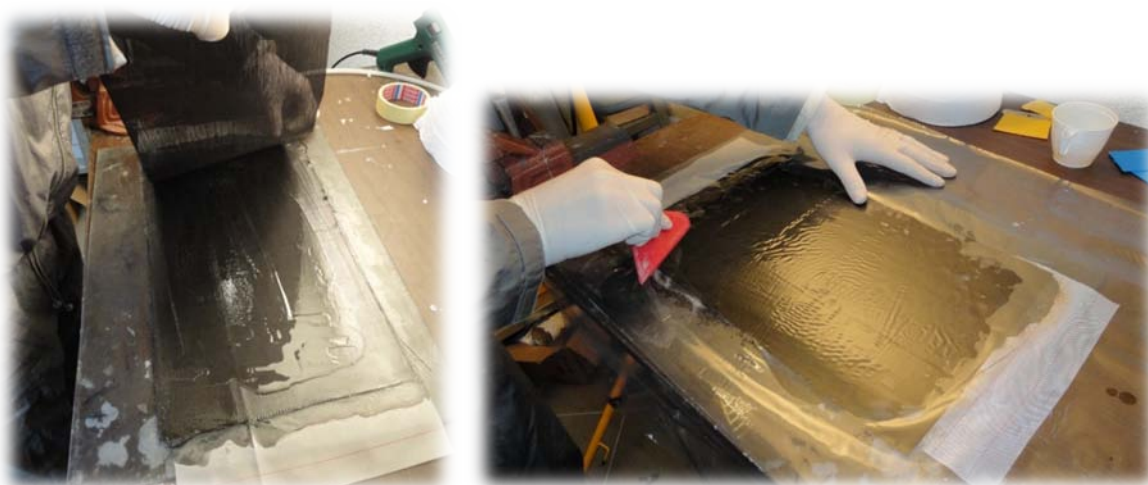
**Slika 26. Priprema polimerne matrice : a) vaganje komponenata; b) miješanje komponenata**

- **Impregniranje tkanine smolom (laminiranje)**

Prije početka laminiranja na staklenu površinu postavlja se „*abraž*“ tkanina, slika 27, zatim dolaze slojevi tkanine koji se impregniraju polimerom, slika 28. Kod laminiranja potrebno je polimer što bolje rasporediti po tkanini kako bi se postigla što bolja impregnacija i izbjeglo stvaranje mjehurića sa zrakom koji narušavaju svojstva. Također treba obratiti pažnju na pritisak kojim se polimer razmazuje kako se ne bi razdvojila vlakna u tkanju.



**Slika 27. Postavljanje "abrazj" tkanine**



**Slika 28. Laminiranje kora**

Fizikalna svojstva polimera i otvrdnjivača prikazana su u tablici 5. Kore su, kako je rečeno, izrađene od tzv. „plain“ tkanja ugljičnih vlakana.

Tablica 5. Fizikalna svojstva polimera i otvrdnjivača

	Polimer	Otvrdnjivač
Pojedine komponente	Biresin CR120	Biresin CH120-3
Viskozitet $\mu$ , 25 °C, mPas	900	<10
Gustoća, 25 °C, kg/m <sup>3</sup>	1130	940
Omjer miješanja, težinski	100	30
	Mješavina	
Vrijeme prerade, 100 g, sobna temperatura, min.	130	
Viskozitet mješavine $\mu$ , 25 °C	240	

- Izrezivanje kora na dimenziju

Nakon završenog postupka laminiranja, kore sendvič kompozita izrezane su na dimenzije, slika 29, :

TLAK – 380 x 210 mm

VAKUUM – 350 x 210 mm

i zatim postavljene na jezgru od NOMEX – a, slika 30.



**Slika 29.      Rezanje kora**



**Slika 30.      Postavljanje kora na jezgru**

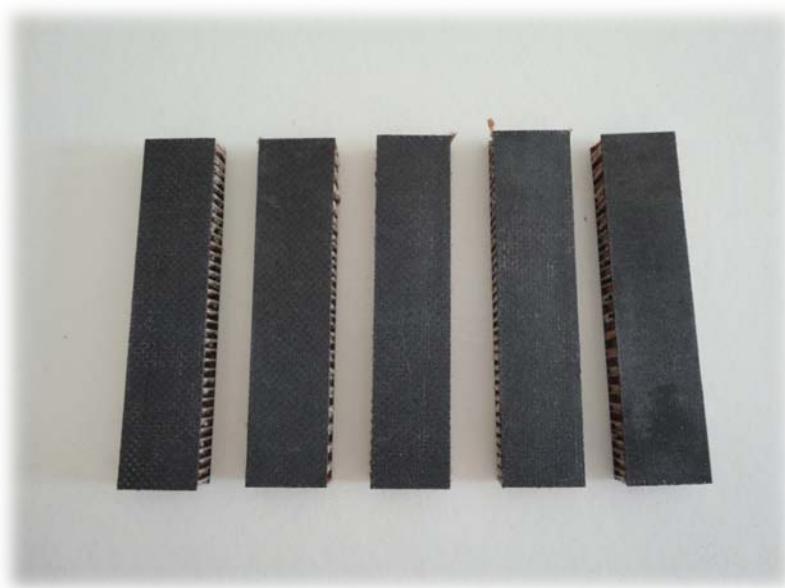
- **Polimerizacija**

Polimerizacija ploča sendvič kompozita izrađenih tlakom i vakuumom odvijala se na temperaturi  $70^{\circ}\text{C}$  u trajanju od 16 h. Dodatna polimerizacija postignuta je držanjem na temperaturi  $120^{\circ}\text{C}$  u trajanju 12 h čime su postignuta željena svojstva sendvič kompozita kao što su maksimalna čvrstoća i krutost. Karakteristike peći nisu poznate.

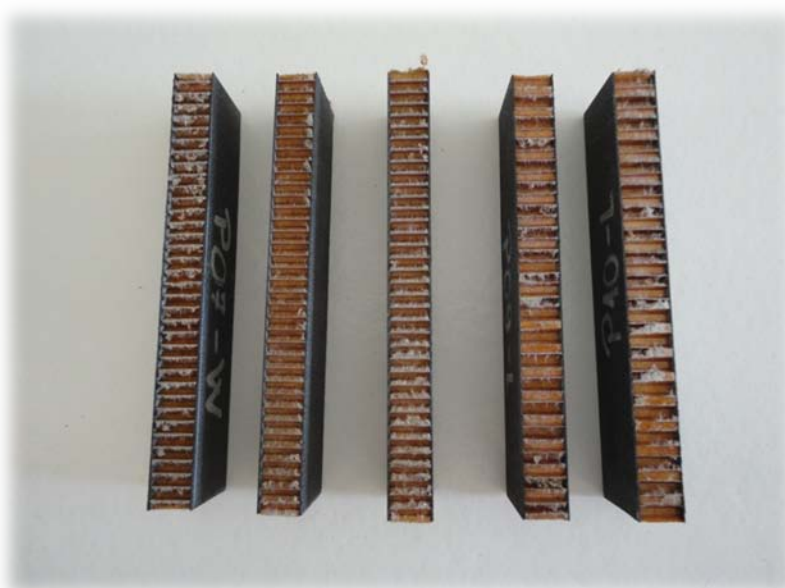


- **Izrezivanje uzoraka**

Nakon polimerizacije u peći iz ploče su izrezani uzorci dimenzija 115 x 25 mm, slika 31 i slika 32. Problem pri izrezivanju uzoraka bila je jezgra od NOMEX - a koja se pokida ako pila nije dovoljno oštra i velikog broja okretaja. Iz tog je razloga za izrezivanje korištena kružna pila.



**Slika 31.      Gotovi uzorci**

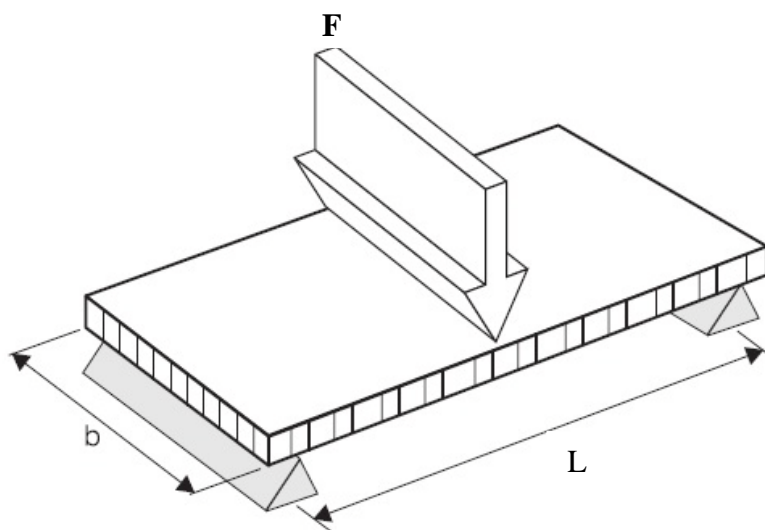


**Slika 32.      Gotovi uzorci (bočni pogled)**

## 6. Ispitivanje sendvič kompozita prema normi ASTM C393-00

Navedena norma definira postupak ispitivanja savojne čvrstoće sendvič kompozita opterećenjem u tri točke, slika 33. Rezultati koje je moguće dobiti ovakvim ispitivanjem su smično naprezanje u jezgri i savojno naprezanje  $\sigma$  u korama sendvič kompozita. Potrebna oprema za ispitivanje je kidalica sa mogućnošću održavanja kontroliranog opterećenja sa točnošću od  $\pm 1\%$  od detektirane vrijednosti. Ispitni uzorak treba biti pravokutnog presjeka, širine ne manje od dvostruke debljine sendviča i ne veće od polovine raspona valjčica kidalice, prema naputku iz norme. Duljina uzorka treba biti jednaka duljini raspona valjčica kidalice plus 50 mm. Ako su uzorci bili izloženi vlazi potrebno ih je osušiti u prostoriji sa kontroliranom temperaturom i vlažnošću kako bi se masa uzoraka ustalila (dozvoljena oscilacija u masi uzoraka je  $\pm 1\%$ ). Ispitivanje bi se trebalo provesti u prostoriji temperature  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  relativne vlažnosti  $50 \pm 5\%$  po zahtjevima za standardne uvjete. Procedura ispitivanja je slijedeća :

- Postavljanje uzorka na kidalicu za savojno opterećenje u tri točke
- Konstantno opterećenje uzorka preko čeličnih pločica ili valjčica
- Ako se nakon ispitivanja probnog uzorka utvrdi lokalno drobljenje kore, na mjestima oslonaca dozvoljeno je postaviti ravne pločice od čelika ili gume kako bi se raspodjelilo opterećenje na veću površinu



**Slika 33. Skica savojnog opterećenja u tri točke**



Ispitivanje uzoraka sendvič kompozita od NOMEX – a provedeno je u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje na statičkoj tlačnoj kidalici prema ASTM C393-00 normi. Ukupno je ispitano dvadeset uzoraka, po pet za svaku tehnologiju i orijentaciju jezgre. Prvo je bio ispitivan probni uzorak kako bi se odredili optimalni parametri kidalice kao što su početna udaljenost od ispitnog uzorka i brzina savijanja.

## 6.1. Izvještaj ispitivanja

- **Opis ispitnih uzoraka, materijala jezgre i kora te adheziva**

Uzorci za ispitivanje izrađeni su od NOMEX sendviča koji se sastoji od aramidne jezgre ECA 3.2 – 48 čija su svojstva ranije prikazana u tablici 3 i laminatnih kora od tkanja ugljičnih vlakana u epoksidnoj matrici CR120 koja je ujedno služila i kao adheziv.

- **Dimenzije ispitnih uzoraka, orijentacija jezgre**

Ispitni uzorci imaju dimenzije :

- duljina  $l = 115$  mm
- širina  $b = 25$  mm
- debljina  $d = 11$  mm uzorci izrađeni tlakom;  $d = 10.9$  mm uzorci izrađeni vakuumom

Jezgra sendviča ima W i L orijentacije ćelija prikazane u drugom polglavlju, slika 12, te su tako i označavani pojedini uzorci.

### **Primjer označavanja uzoraka:**

- **P01-L**

P – oznaka tehnologije izrade (P = tlak, V = vakuum)

01 – broj uzorka

L – smjer orijentacije jezgre (L i W orijentacija)

- **Tip opterećenja, raspon oslonaca kidalice**

Provedeno je savojno opterećenje uzoraka u tri točke, slika 33. Raspon oslonaca kidalice je

$L = 65 \text{ mm}$ .

- **Polimerizacija uzoraka**

Uzorci su polimerizirali pri temperaturi od  $70^\circ\text{C}$  u trajanju 16 h i dodatna polimerizacija obavljena je u peći na temperaturi  $120^\circ\text{C}$  trajanja 12 h.

- **Temperatura ispitivanja i vrijeme držanja uzoraka na temperaturi**

Ispitivanje je izvršeno na temperaturi od  $23^\circ\text{C}$  što odgovara uvjetima u ispitnoj prostoriji a uzorci su držani na toj temperaturi oko 30 min kako bi se temperatura ustalila.

- **Brzina opterećenja na kidalici**

Uzorci su opterećeni konstantnom brzinom od  $5 \text{ mm/min}$ .

- **Rezultati ispitivanja**

1.) Proračun

Smično naprezanje u jezgri može se izračunati iz jednadžbe :

$$\tau = \frac{F_{\max}}{(d + c)b} \quad (6)$$

gdje je :

$\tau$  = smično naprezanje u jezgri,  $\text{N/mm}^2$ ;

$F_{\max}$  = opterećenje, N;

$d$  = debljina sendvič kompozita, mm;

$c$  = debljina jezgre, mm;

b = širina sendvič kompozita, mm;

Dimenzije uzoraka su ranije navedene a Fmax je navedena u tablici 6.

Savojno naprezanje u korama može se izračunati iz jednadžbe :

$$\sigma = \frac{F_{\max} L}{2t(d + c)b} \quad (7)$$

gdje je :

$\sigma$  = savojno naprezanje u kori, N/mm<sup>2</sup>;

t = debljina kore, mm;

L = raspon oslonaca kidalice, mm;

Debljina kore t je za tehnologiju tlaka 0.5 mm a vakuuma 0.45 mm; ostale dimenzije navedene su ranije.

## 2.) Rezultati ispitivanja uzoraka :

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja uzoraka  $\tau$  – smično naprezanje u jezgri,  $\sigma$  – savojno naprezanje u korama**

UZORAK	Fmax N	$\delta$ mm	$\tau$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma$ N/mm <sup>2</sup>
P03-L	423,00	1,01173	0,806	52,371
P04-L	444,40	0,97665	0,846	55,021
P05-L	445,50	1,02811	0,849	55,157
P03-W	357,75	1,93335	0,679	44,157
P04-W	356,65	1,61664	0,679	44,157
P05-W	360,00	1,66826	0,686	44,571
V01-L	482,65	1,1116	0,924	66,714
V04-L	540,00	1,13496	1,033	74,641
V05-L	501,75	1,3065	0,96	69,354
V01-W	408,40	1,64509	0,782	56,451
V03-W	407,25	1,69168	0,779	56,292
V04-W	383,65	1,72852	0,734	53,03

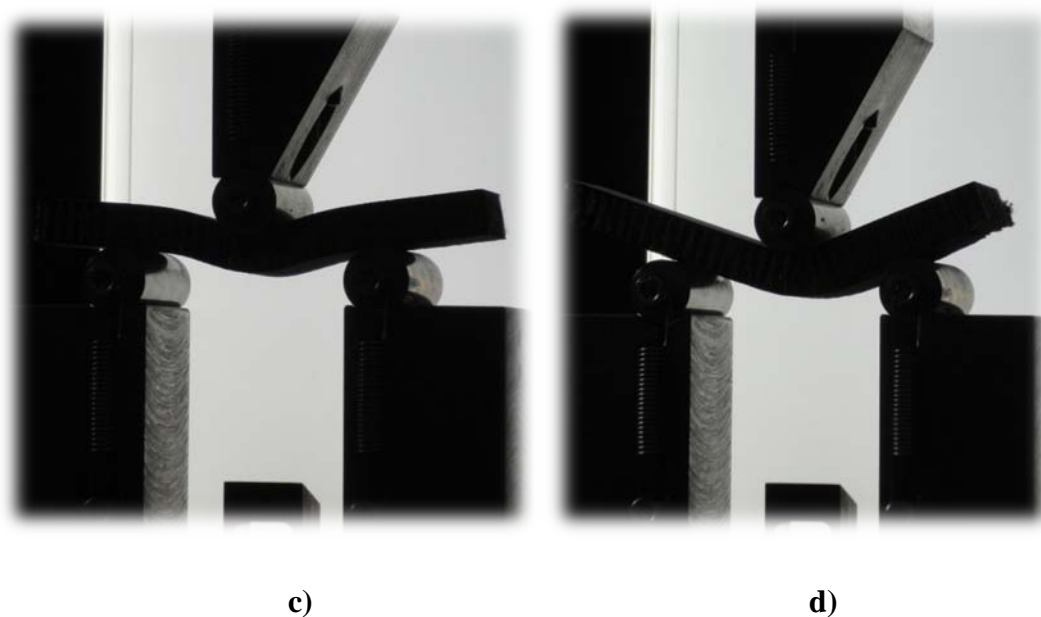
Iz rezultata u tablici 6 izbačeni su uzorci kod kojih se pojavila minimalna odnosno maksimalna čvrstoća. Iznosi sila i oznake odbačenih uzoraka prikazani su u tablici 7.

**Tablica 7. Odbačeni rezultati ispitivanja**

UZORAK	IZNOS SILE N
P01-L	$F_{\min} = 415,15$
P02-L	$F_{\max} = 447,75$
P01-W	$F_{\max} = 636,40$
P02-W	$F_{\min} = 352,15$
V02-L	$F_{\max} = 594,00$
V03-L	$F_{\min} = 480,40$
V02-W	$F_{\max} = 432,00$
V05-W	$F_{\min} = 364,50$

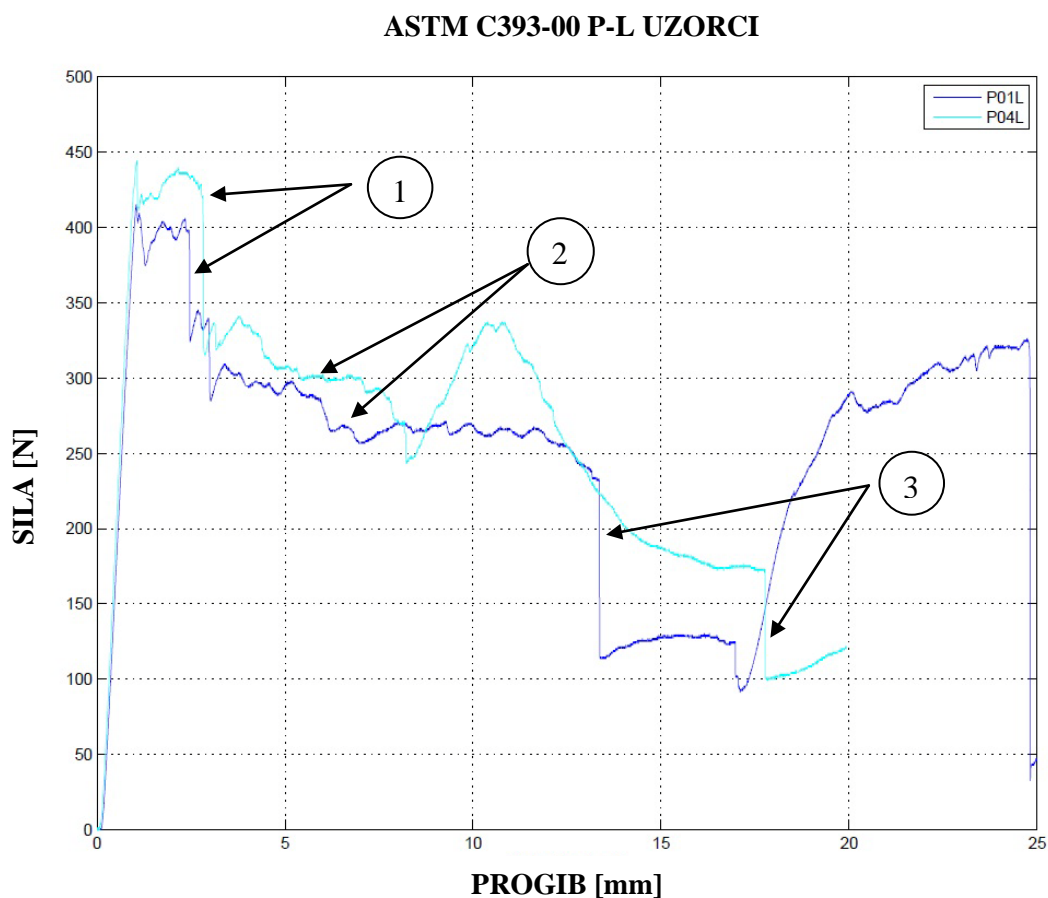
U nastavku su priložene slike ispitivanja uzoraka, slika 34. a) – d), te dijagramski prikazi karakterističnih rezultata za pojedine tehnologije izrade i orijentacije jezgre.

**a)****b)**



**Slika 34. Tijek ispitivanja uzoraka a) - d)**

Na slici 34 može se vidjeti ponašanje V uzoraka tijekom ispitivanja. a) Početak ispitivanja, dovođenje kidalice u početni položaj; b) Savijanje sendvič kompozita u elastičnom području, sve veći porast sile  $F$ ; c) Pojava maksimalnih smičnih naprezanja između jezgre i donje kore sendviča, pucanje gornje kore, specifičan izgled progibne linije; d) Pucanje donje kore i odvajanje od jezgre. Može se uočiti promjena izgleda progibne linije s vremenom što ovisi o tehnologiji izrade i raspodjeli opterećenja u sendvič kompozitu te različitim modovima pucanja.



**Slika 35. Karakteristične krivulje opterećenje - progib za P-L uzorke**

Na prethodnom dijagramu za P-L uzorke, slika 35, mogu se uočiti tri karakteristična područja. Područje krivulja označeno brojem 1 označava pucanje gornje kore. Pod brojem 2 označeno je drobljenje jezgre. Broj 3 označava pucanje donje kore sendvič kompozita. Ova područja u nastavku su prikazana i stvarnim slikama ispitivanja P-L uzoraka. Na slici 36 može se uočiti prašina oko ispitnog valjčića što ukazuje na pucanje gornje kore. Zatim slijedi drobljenje jezgre i naglo pucanje gornje kore na još jednom mjestu što je karakteristično za P uzorke, slika 37. Na kraju dolazi do pucanja donje kore što se također vidi kao sitna prašina čestica ugljika, slika 38.



**Slika 36. Pucanje gornje kore**



**Slika 37. Drobljenje jezgre**

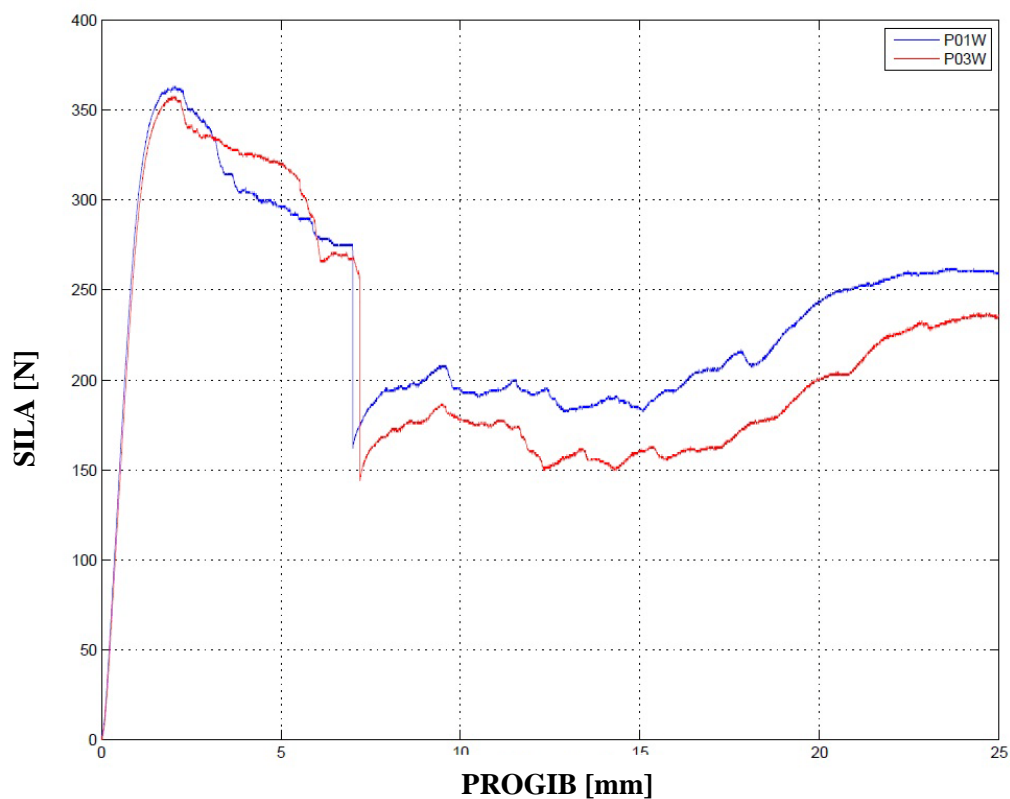




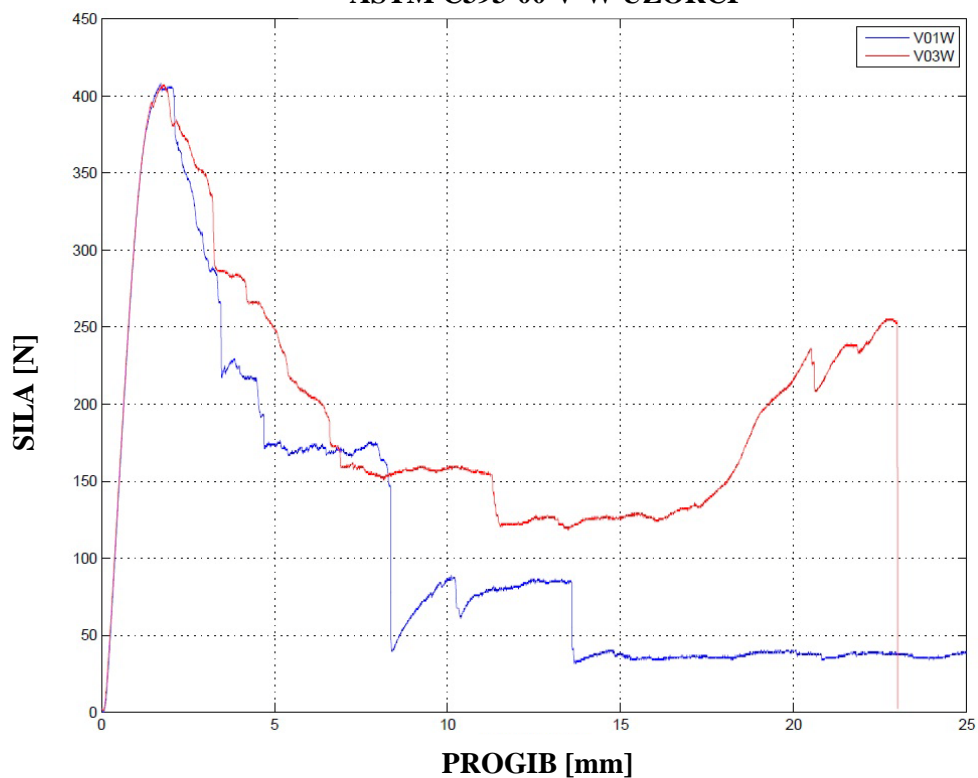
**Slika 38. Pucanje donje kore**

Dijagrami na slikama 39-41 pokazuju rezultate ispitivanja P-W, V-W i V-L uzoraka.

## ASTM C393-00 P-W UZORCI

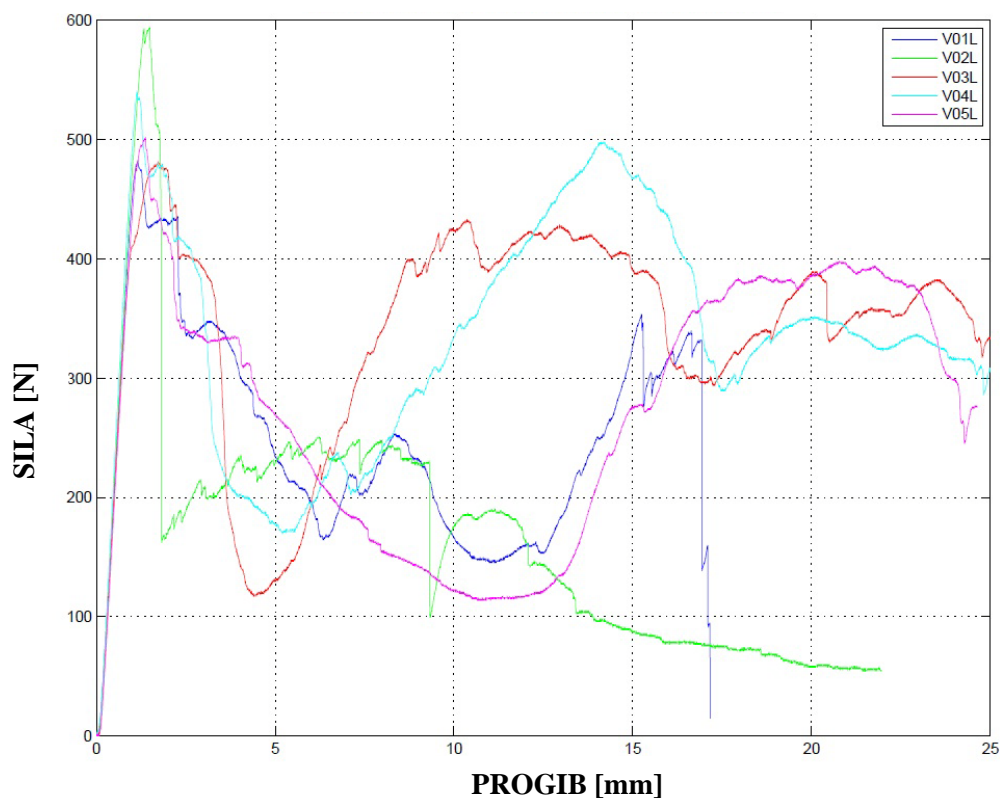


Slika 39. Karakteristične krivulje opterećenje - progib za P-W uzorke  
ASTM C393-00 V-W UZORCI



Slika 40. Karakteristične krivulje opterećenje - progib za V-W uzorke

## ASTM C393-00 V-L UZORCI



Slika 41. Krivulje opterećenje - progib za V-L uzorke

Na prethodnim dijagramima, slika 39-41, može su uočiti da se maksimalne sile kod svih tehnologija izrade javljaju u rasponu progiba od 0 – 2.5 mm. Nagib krivulje opterećenje - progib je također vrlo velik što ukazuje na vrlo veliki modul elastičnosti ispitnih uzoraka.

- **Modovi pucanja uzoraka**

Pri ispitivanju uzoraka pojavili su se različiti modovi pucanja koji ovise o tehnologiji izrade i orijentaciji jezgre te raspodjeli opterećenja u sendvič kompozitu.

**Uzorci P-L :**

- Pucanje gornje kore oko ispitnog valjčića i drobljenje jezgre te zatim pucanje donje kore

Ovi modovi pucanja mogu se dobro uočiti na dijagramu, slika 35, gdje se vidi strmi pad u iznosu opterećenja nakon pucanja prve kore te zatim niz „brežuljaka“ koji ukazuju na drobljenje jezgre. Pucanje donje kore također se može uočiti po strmom padu krivulje pri progibu većem od 10 odnosno 15 mm.

#### **Uzorci P-W :**

- Pucanje gornje kore oko ispitnog valjčića i drobljenje jezgre te pucanje donje kore

Uzorci izrađeni tlakom sa orijentacijom jezgre u W smjeru imaju slično ponašanje kao i u L smjeru sa razlikom u postupnom pucanju gornje kore koje je popraćeno sa drobljenjem jezgre što se može uočiti iz dijagrama, slika 39. Također se može uočiti da pucanje donje kore nastupa ranije nego kod L uzoraka.

#### **Uzorci V-L :**

Specifičnost ovih uzoraka je u tome što imaju maksimalnu čvrstoću i različite oblike krivulja opterećenje – progib ovisno o modu pucanja.

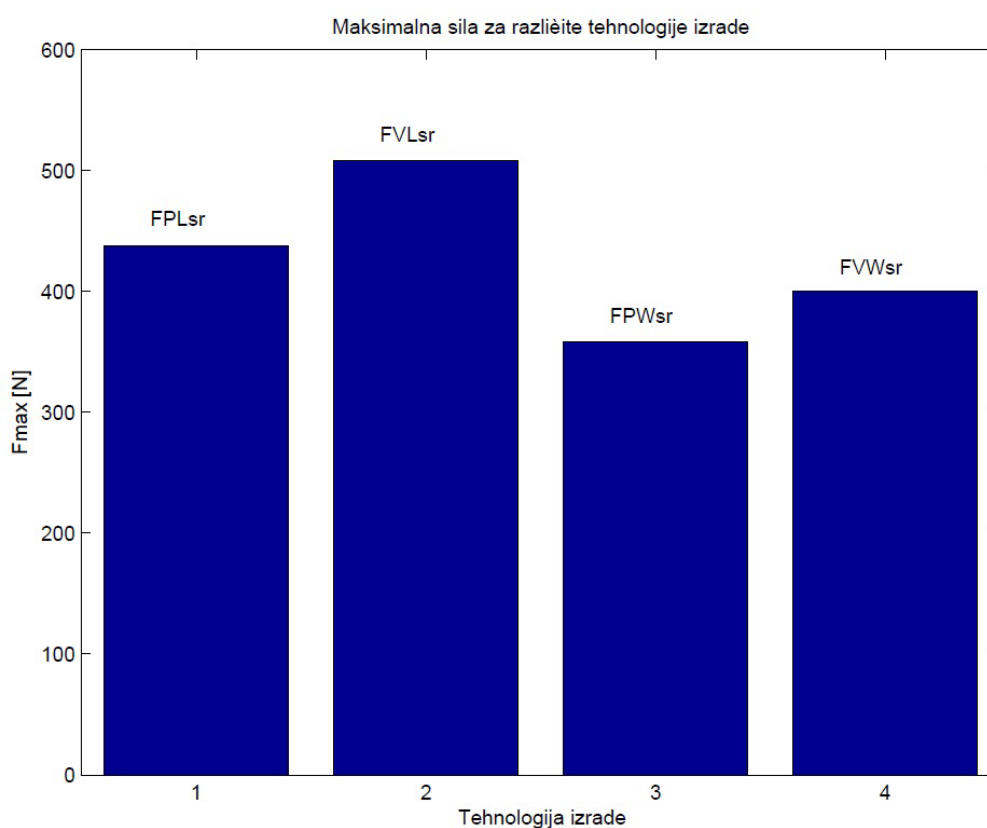
- Pucanje gornje kore oko ispitnog valjčića i drobljenje jezgre javlja se kod svih uzoraka
- Pucanje donje kore pojavilo se samo kod uzorka V01-L što se može vidjeti na dijagramu kod progiba oko 17 mm, slika 41.
- Uzorak V02-L kod kojeg se javilo maksimalna čvrstoća odbačen je. Kod njega ne dolazi do drobljenja jezgre i pucanja kore oko ispitnih valjčića već gornja kora vrlo naglo puca nakon što je sila dotigla 594 N a zatim opterećenje preuzima jezgra i donja kora. Iz tog razloga dolazi do vrlo velikih smičnih naprezanja između jezgre i kore te veze adheziva popuštaju i donja kora se odvaja od jezgre što se vidi na dijagramu, slika 41, pri progibu od oko 9 mm.

#### **Uzorci V-W :**

- Kod ovih uzoraka također se pojavljuje specifičan mod pucanja kod uzoraka V01-W i V03-W a to je pucanje kompletnog uzorka na pola nakon što su se prvo javili modovi pucanja 1b i 1a prikazanih na slici 18.

- Pucanje gornjeg sloja i drobljenje jezgre
- Smicanje donjeg sloja i jezgre i pucanje donjeg sloja

Slika 42 prikazuje rezultate ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka sendvič kompozita od NOMEX – a u ovisnosti o tehnologiji izrade i orijentaciji ćelija.



**Slika 42. Prikaz srednjih vrijednosti maksimalnih sila  $F$  za različite tehnologije izrade uzoraka (1 – tlak i L orijentacija ćelija; 2 – vakuum i L orijentacija ćelija; 3 – tlak i W orijentacija ćelija; 4 – vakuum i W orijentacija ćelija)**

## 7. Zaključak

Rezultati ispitivanja sendvič kompozita od NOMEX – a prema normi ASTM C393-00 pokazali su ovisnost strukture i orijentacije jezgre, W odnosno L smjer, te tehnologije izrade o savojnoj čvrstoći. Pretpostavke koje su se odnosile na uzorke kao što su veća čvrstoća u L smjeru ćelija i veće maksimalno savojno opterećenje za vakuum tehnologiju izrade pokazale su ispravnim. Različiti modovi pucanja koji su se javljali kod pojedinih uzoraka ukazuju da bez obzira na tehnologiju izrade L orijentacija ćelija može podnijeti puno veća opterećenja. Iz priloženih dijagrama može se također zaključiti da uzorci sa W orijentacijom ćelija imaju puno „blaže“ skokove krivulja opterećenje - progib od L uzoraka. Očekivano najveća savojna čvrstoća pojavila se kod vakuum tehnologije i L orijentacije ćelija, slika 42. Proučavanjem uzoraka nakon ispitivanja zajedno sa uočenim modovima pucanja može se zaključiti da su uzorci izrađeni vakuumom puno krući od uzoraka izrađenih tlakom. Kod V-L uzoraka gornja kora je zdrobljena oko ispitnog valjčića za razliku o P-L uzoraka gdje je naglo pukla najčešće na dva mjesta oko valjčića. Uzrok tome je bolja impregnacija smole između ugljičnih vlakana kod vakuuma nego kod tlaka. Uključci zraka koji su kod tlaka ostali zarobljeni između vlakana i na taj način uzrokovali nehomogenost sendviča vakuumom su istisnuti. Također se kod vakuuma polimer kapilarno upio uz zidove ćelija što se može vrlo dobro vidjeti golim okom. To je uzrokovalo dodatno očvršnuće jezgre koje nije bilo prisutno kod tlaka. Iz rasporeda ćelija, slika 12, jezgre vidi se da kod L orijentacije savojna i smična opterećenja nose zidovi ćelija koji su međusobno spojeni što nije slučaj ako opterećenje djeluje u W smjeru. Rezultati ispitivanja P uzoraka to i dokazuju, jer se pucanje donje kore kod W orijentacije ćelija dogodilo ranije nego kod L orijentacije gdje su dio naprezanja preuzeli zidovi ćelija. Također kod V-L uzoraka samo je u slučaju V01-L došlo do pucanja donje kore dok je kod V-W uzoraka donja kora pukla na svakom uzorku.

## 8. Literatura

- [1] <http://www.boeing.com>
- [2] Carlsson, L.A., Kardomateas, G.A., „Structural and failure mechanics of sandwich composites“, Springer.
- [3] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J., „Svojstva i primjena materijala“, Zagreb, 2006.
- [4] Baker, A., Dutton, S., Kelly, D., „Composite materials for aircraft structures“, AIAA Educational series, 2004.
- [5] Guide to composites, [www.gurit.com](http://www.gurit.com)
- [6] Smojver I., „Mehanika kompozitnih materijala“, Zagreb, ver. 06/2007.
- [7] Herakovich C. T., „Mechanics of fibrous composites“, Wiley, 1997.
- [8] Niu Chung-Yung M., „Airframe structural design“, Connmilit press ltd., 1995.
- [9] <http://www.ipm.virginia.edu>
- [10] <http://www.nauticexpo.com>
- [11] <http://www.tradenote.net>
- [12] Zok F. W., Rathbun H.J., Wei Z., Evans A.G., „Design of metallic textile core sandwich panels“, University of California, 2003.
- [13] <http://www.fibre-reinforced-plastic.com>
- [14] <http://www.hexcel.com>, „Honeycomb sandwich design technology“
- [15] <http://www.hexcel.com>, „Mechanical testing of sandwich panels“
- [16] Tomblin J., Lacy T., Smith B., Hooper S., Vizzini A., Lee S., „Review of damage tolerance for composite sandwich airframe structure“, FAA Final Report, August 1999.

- [17] <http://www.euro-composites.com>



## **PRILOZI**

PRILOG 1 : Dijagram ispitivanja P-L uzoraka

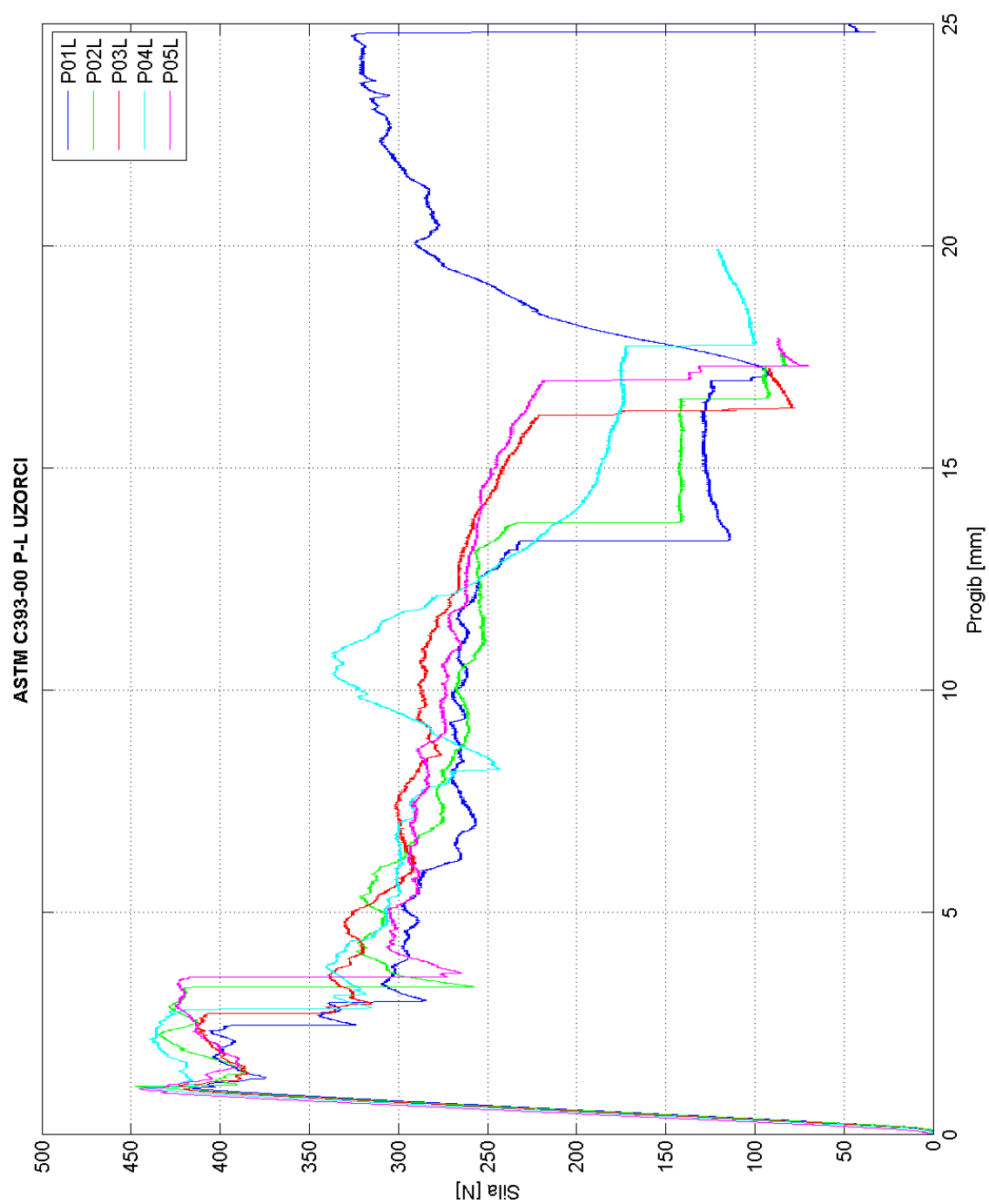
PRILOG 2 : Dijagram ispitivanja P-W uzoraka

PRILOG 3 : Dijagram ispitivanja V-L uzoraka

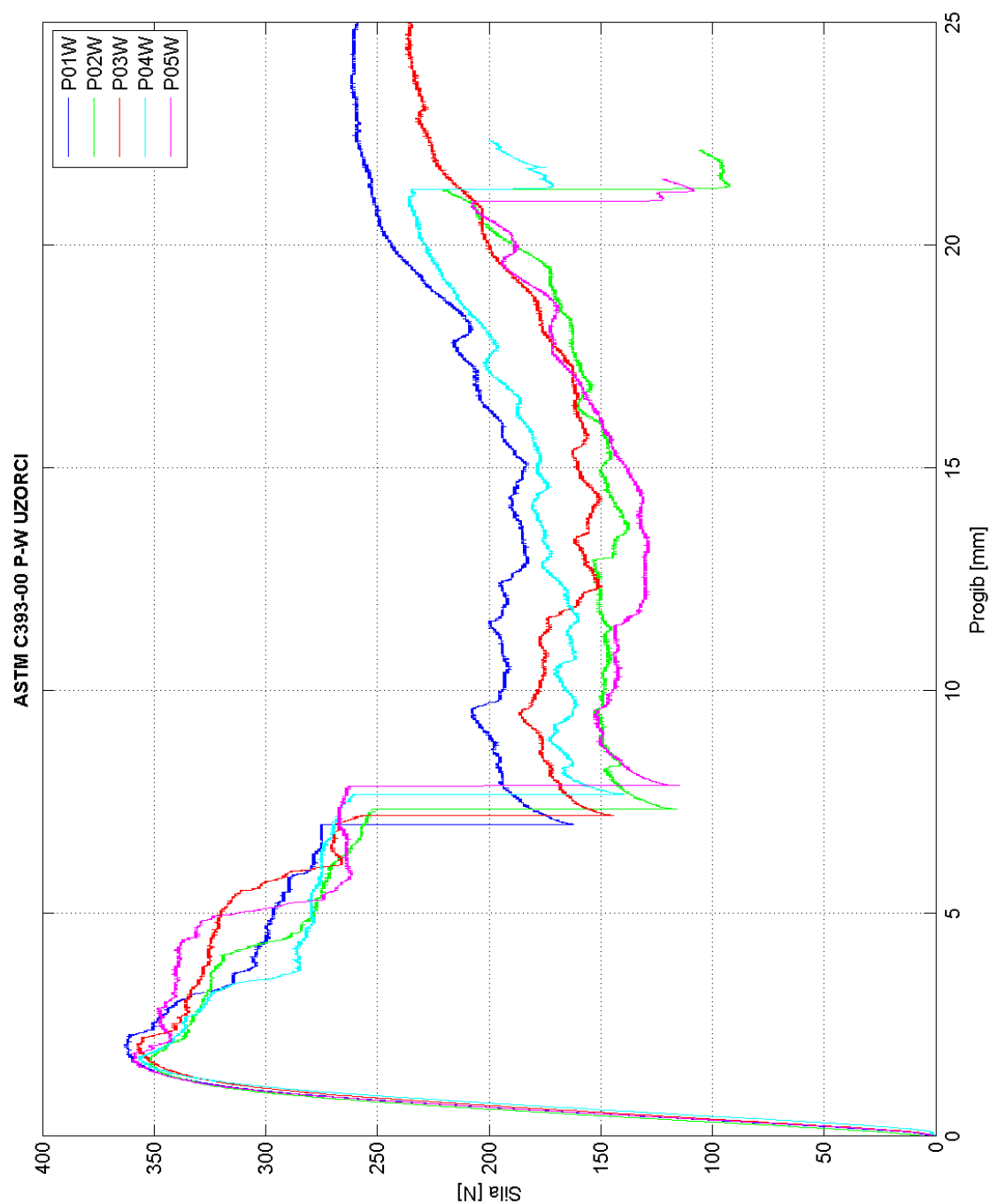
PRILOG 4 : Dijagram ispitivanja V-W uzoraka

PRILOG 5 : CD – R disc

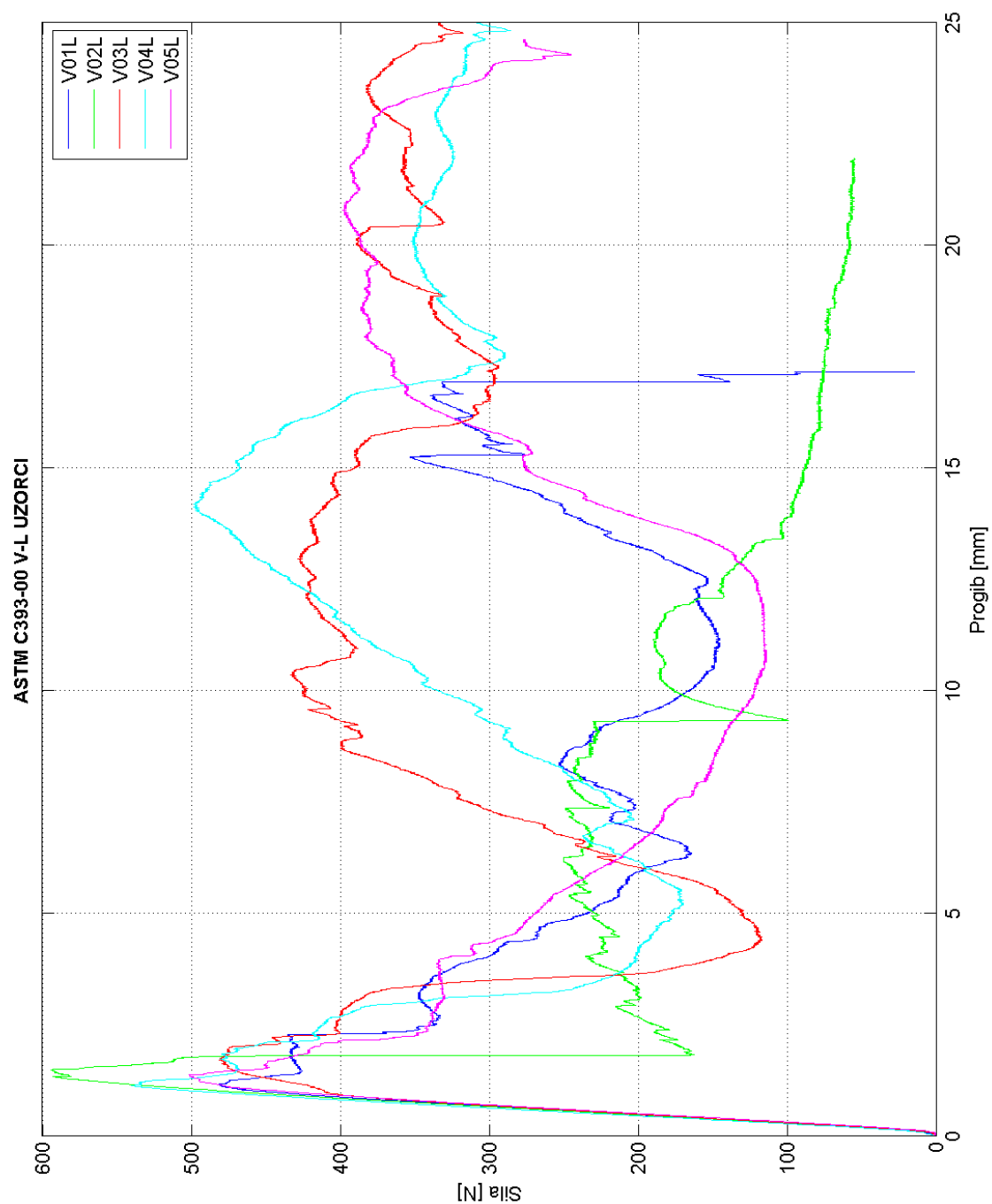
## PRILOG 1 : Dijagram ispitivanja P-L uzoraka



## PRILOG 2 : Dijagram ispitivanja P-W uzoraka



## PRILOG 3 : Dijagram ispitivanja V-L uzoraka



## PRILOG 4 : Dijagram ispitivanja V-W uzoraka

